UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA DE GESTION MINERA

**CARACTERIZACIÓN IN SITU DE MINERAL
AURÍFERO PREVIO A SU PROCESAMIENTO
MEDIANTE EL SISTEMA DE COLORES
MUNSELL EN LABORES DE CATEO LIBRE –
COMPAÑÍA MINERA PODEROSA S.A.**

Tesis para optar al Título de Ingeniero de Gestión Minera:

AUTOR:

ANCHELIA GUERRERO, ANUAR ROBERT ([0000-0002-7072-7155](#))

ASESOR:

EDGAR WILLIAM ALAYO LEON ([0000-0002-8618-5653](#))

Lima, 07 de Abril del 2018

DEDICATORIA

*A mi querida madre, Elsa
Guerrero por iluminar y
orientarme para seguir
luchando en el gran camino de
la vida.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mi alma mater Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por concederme la oportunidad de realizar el presente trabajo de tesis para optar el título de Ingeniero de Gestión Minera.

Mi más sincero agradecimiento a la Arq. Luz Evangelina Arias Vargas de Sologuren, presidenta del Directorio de Compañía Minera Poderosa S.A., por permitirme el acceso a mina, por su apoyo logístico y financiero para hacer realidad la presente investigación.

A mi asesor Msc. Edgar Alayo por sus enseñanzas, sus constantes consejos y comentarios para la realización de la presente tesis.

De manera especial a los miembros del Jurado: MSc. Luis Arauzo, MSc. Juan Jara, y MSc. Vidal Aramburu; por sus orientaciones y recomendaciones que han permitido consolidar el trabajo de investigación.

Igualmente, agradecer a todos los colaboradores de Compañía Minera Poderosa S.A. y de manera especial a los Ingenieros: Marcelo Santillana, Gerente General; Diego Sologuren, Coordinador Estratégico; Máximo Simón, Asistente de Superintendencia de Planta; Carlos Villanes, Jefe de Prospección y Exploración Regional; Jaime Suni, Jefe de Acopio y Luz Mateu, Jefa de Laboratorio Químico.

Asimismo, agradecer al MSc. Hernán Zapata, MSc Luigi Sassarini y a los Ing. Juan La Riva y Fredy Pérez; por sus consejos y criterios en el campo de la ciencia de la tierra y gestión minera.

RESUMEN

En la presente tesis se estudia la aplicación del Sistema de Colores Munsell, para la caracterización de mineral aurífero proveniente de “labores de cateo libre” antes de su procesamiento; para tal efecto se considerarán los aportes que brindan las disciplinas de geología, mineralogía, química de los minerales y el mismo proceso metalúrgico.

La investigación se llevó a cabo en la cordillera oriental de los Andes, al norte de Perú en la provincia de Pataz, donde se encuentra el Batolito de Pataz, yacimiento de tipo orogénico asociado a procesos de metamorfismo y caracterizado por vetas auríferas acompañadas de cuarzo y sulfuro; específicamente en el área de influencia de las actividades de la Compañía Minera Poderosa S.A.

Con la aplicación del Sistema de Colores Munsell para rocas se caracterizó los minerales auríferos, en el que se buscó la asignación de un nombre de color estandarizado para cada tipo mineral, los cuales se caracterizaron por medio de ensayos químicos y pruebas metalúrgicas para verificar la correlación entre estos minerales con sus respectivos colores, evitando así la subjetividad del color. Se tomó el color como un indicador de comportamiento, tanto en leyes de oro como recuperación metalúrgica, partiendo de esta propiedad organoléptica se puede tomar decisiones

adecuadas, in situ, de clasificación y caracterización de estos minerales con un alto grado de confiabilidad con el fin de mejorar la recuperación de oro fino global. Para investigar y comprobar el objeto de estudio, se realizaron visitas técnicas a diferentes zonas donde se llevan a cabo “labores de cateo libre”, verificándose la variación de la mineralogía de los minerales extraídos. Asimismo, se consideró los estudios realizados de la geología de la zona, la misma que permite corroborar lo que se veía en el campo. Del mismo modo, se realizó el seguimiento del mineral aurífero desde su extracción, pudiendo así definir el producto final, que llega a la planta de beneficio, como una mezcla heterogénea de minerales de composición física y química definida.

De manera teórica y cuantitativa, se demuestra que mediante la aplicación de la notación Munsell, es posible caracterizar minerales in situ y tomar decisiones para su procesamiento con un alto grado de confiabilidad.

Palabras clave: Color, Munsell, Mineral, Minería, Geología, Mineralogía, Batolito, Pataz.

ABSTRACT

The purpose of the current thesis is studying the possibility of Munsell Color System application in order to get gold ore characterization before its process. It is important, to mention that this research consider several contributions, which have been taken from geology, mineralogy, ore chemistry, and metallurgical process.

This research took place in the eastern mountain range of the Andes, in the north of Peru in the province of Pataz, where the Pataz Batholith is located, an orogenic type deposit associated with processes of metamorphism and distinguished by its auriferous veins accompanied by quartz and sulfur; this mining site is specifically in the area of influence of the activities of Compañía Minera Poderosa S.A.

The objective of Munsell Color System application is the assignment of a standardized color name for each mineral identified, this task will be determined by means of chemical tests and metallurgical tests for verifying whether there is a correlation between these minerals and their respective colors, thus, subjectivity of color is avoided. According to research literature, the color was taken as an indicator of behavior for gold grades as well as for metallurgical recovery. Therefore, through these organoleptic properties, the findings of this research could benefit decision-makings, in situ, about classifying and characterizing ores with a high degree of reliability. In order

to verify the objective of the study, technical visits were made to different areas where "Cateo Libre" work was carried out, this way it was easy to verify the mineralogy variation of extracted minerals. Preliminary geology studies of the area were taken into consideration, since they were confirming statements about different events at the area. Likewise, the fact of observing the route of the gold ore from its extraction was very helpful because it enabled to define the final product, which reaches the profit plant, as a heterogeneous mixture of ores defined physical and chemical composition. In a theoretical and quantitative way, it is demonstrated that Munsell notation application allows ores characterization, in situ, and make decisions for their processing with a high degree of reliability

Keywords: Color, Munsell, Mineral, Mine, Geology, Mineralogy, Batholith, Pataz.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO

NOMENCLATURA

INTRODUCCIÓN..... 1

**CAPITULO I PLANTEAMIENTO Y PRESENTACION DE LA OPORTUNIDAD
DE INVESTIGACION..... 4**

1.1 Antecedentes generales..... 4

1.2 Descripción de la problemática 6

1.3 Objeto de la investigación 11

1.4 Objetivos de la investigación..... 11

1.4.1 General..... 11

1.4.2 Específicos..... 11

1.5 Justificación..... 12

CAPITULO II FUNDAMENTOS METODOLOGICOS..... 13

2.1 Tipo de investigación 13

2.2 Metodología de investigación..... 14

2.2.1 Población y Muestra 14

2.2.2 Instrumentos de investigación 16

2.2.3 Fuentes de información 17

2.2.3.1 Información primaria..... 17

2.2.3.2 Información secundaria 17

2.3 Diseño y proceso de investigación 18

2.3.1 Fase I – Datos iniciales 18

2.3.2 Fase II – Muestreo 19

2.3.3 Fase III – Procesamiento de datos 19

2.3.4 Fase IV – Análisis de datos 21

2.3.5 Fase V – Informe final..... 21

2.4 Procesamiento de la información 22

2.5 Determinación de la hipótesis de trabajo..... 24

2.5.1 Identificación de variables de estudio 24

2.5.1.1 Variable Independiente..... 24

2.5.1.2 Variable Dependientes..... 24

2.5.2 Operacionalidad de las variables 25

CAPITULO III MARCO TEORICO, ESTADO DEL ARTE Y MARCO	
REFERENCIAL.....	26
3.1 Marco histórico.....	26
3.2 Marco organizacional	28
3.3 Marco contextual	30
3.3.1 Geología Regional	30
3.3.1.1 Geomorfología.....	32
3.3.1.2 Estratigrafía	32
3.3.1.3 Geocronología	33
3.3.2 Geología Local	42
3.3.2.1 Litología	42
3.3.2.2 Alteración	47
3.3.2.3 Mineralización	49
3.3.3 Yacimiento de Mineral	51
3.3.4 Mineralogía.....	54
3.3.5 Procesamiento del oro	62
3.3.6 Muestreo y representatividad.....	66
3.4 Marco tecnológico	73
3.4.1 Planta de beneficio o de procesamiento	73
3.4.1.1 Planta de Beneficio Marañón	73
3.5 Marco teórico del color y el mineral	79
3.5.1 Mineral	79
3.5.1.1 Mineral oxidado.....	80
3.5.1.2 Mineral sulfurado	80
3.5.1.3 Mineral – enfoque económico	81
3.5.1.4 Mineral – enfoque geológico, minero y metalúrgico	83
3.5.1.5 Dilución de mineral	84
3.5.2 Color.....	85
3.5.2.1 Color	85
3.5.2.2 Sistema de color Munsell	87
3.5.2.3 Medición del color.....	90
3.5.2.4 Color de mineral	94
3.6 Estado del arte	97
3.6.1 Estado del arte N.º 1	97

3.6.2 Estado del arte N.º 2	99
3.6.3 Estado del arte N.º 3	102
3.6.4 Estado del arte N.º 4	103
3.6.5 Estado del arte N.º 5	104
3.6.6 Estado del arte N.º 6	106
3.6.7 Estado del arte N.º 7	109
3.7 Marco epistemológico	111
3.8 Análisis comparativo de las teorías con la condición de investigación.....	114
3.9 Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación.....	115
4.1 Análisis de las muestras de investigación.....	134
4.1.1 Obtención de muestras para la investigación	134
4.1.2 Representatividad de las muestras obtenidas.....	136
4.1.3 Uso del sistema Munsell para clasificación de mineral.....	138
4.1.4 Información de las muestras de investigación	140
4.1.5 Análisis químico por oro y plata de los compósitos	146
4.1.6 Pruebas de gravedad específica de los compósitos	147
4.1.7 Prueba de ataque ácido a los compósitos.....	148
4.2 Análisis de resultados	150
4.2.1 Análisis químico	150
4.2.2 Prueba de gravedad específica.....	152
4.2.3 Prueba de ataque ácido	154
4.3 Análisis estadístico	159
4.3.1 Análisis deductivo	159
4.3.2 Análisis inductivo	161
4.4 Aplicación.....	167
4.4.1 Clasificación de minerales antes de su procesamiento	167
4.4.2 Impacto del tonelaje según clasificación y caracterización.....	170
4.4.3 Reconocimiento de zonas que aportan minerales.....	172
4.4.4 Evaluación Económica	173
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	176
5.1 Conclusiones.....	176
5.2 Recomendaciones	179
5.3 Sugerencias para investigaciones posteriores.....	180
5.4 Valoración del trabajo de investigación	180

5.5 Aprendizaje profesional y personal	182
REFERENCIAS	183
ANEXOS	189

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1-1: Producción anual nacional de oro de Minera Poderosa.....	5
Figura N° 1-2: Tonelaje del área de Acopio	6
Figura N° 1-3: Aporte en tonelaje de mina y acopio	7
Figura N° 1-4: Aporte en onzas de oro de mina y acopio.....	7
Figura N° 1-5:Ley de oro de operación mina y acopio.....	8
Figura N° 1-6: Recuperación metalúrgica de mina y acopio	8
Figura N° 1-7: Esquema de causa y efecto problema	10
Figura N° 2-1: Diseño de la metodología	18
Figura N° 2-2: Modelo de medición de color	20
Figura N° 3-1: Visión, misión, principios y valores	28
Figura N° 3-2: Organigrama de la compañía.....	29
Figura N° 3-3: Formación y tipo de rocas genéticas	30
Figura N° 3-4: Plano de la Geología regional de la provincia de Pataz	31
Figura N° 3-5: Geomorfología de la zona de estudio	32
Figura N° 3-6: Escala del tiempo geológico	35
Figura N° 3-7: Plano de los ciclos geológicos en PODEROSA	39
Figura N° 3-8: Columna Litoestratigráfica de Pataz.....	40
Figura N° 3-9: Geocronología del batolito de Pataz.....	41
Figura N° 3-10: Mineralogía de rocas ígneas	43
Figura N° 3-11:Clasificación de rocas de Streckeisen.....	43
Figura N° 3-12: Plano de la Geología local de Poderosa	45
Figura N° 3-13: Diagrama conceptual – formación del yacimiento	53
Figura N° 3-14: Diagrama ternario de Au-Ag-Cu	55
Figura N° 3-15: Tipos de asociaciones del oro con sulfuros	58
Figura N° 3-16: Paragénesis del distrito del norte de Pataz	59
Figura N° 3-17 Tipo de oro según granulometría.....	63
Figura N° 0-9: Exactitud y precisión	68
Figura N° 3-19: Muestreo en interior mina	69
Figura N° 3-20: Muestreo en un extremo de faja transportadora	70
Figura N° 3-21: Operación de chancado primario y secundario.....	74
Figura N° 3-22: Diagrama de flujo de planta Marañón	78

Figura N° 3-23: Eh - pH del Fe-S-H ₂ O	81
Figura N° 3-24: Enfoques del mineral	83
Figura N° 3-25: Espectro electromagnético	86
Figura N° 3-26: Diagrama Munsell	90
Figura N° 3-27: Diagrama de matiz, valor y croma de Munsell.....	92
Figura N° 3-28: Tabla Munsell para rocas.....	93
Figura N° 3-29: Clasificación de la materia	115
Figura N° 3-30: Vista de una labor de cateo libre, Pataz.....	115
Figura N° 3-31: Contacto litológico	116
Figura N° 3-32: Vista de labores, zona Santa Filomena.....	116
Figura N° 3-33: Vista de vetas en zonas de Santa Filomena	117
Figura N° 3-34: Acarreo de mineral de labores de cateo libre	117
Figura N° 3-35: Clasificación de mineral por calidad	118
Figura N° 3-36: Acumulación de mineral.....	118
Figura N° 3-37: Mineral en tolvas	119
Figura N° 3-38: mineral proveniente de la zona de contacto litológico	119
Figura N° 3-39: Mineralogía del mineral extraído	120
Figura N° 3-40: Mineralogía - presencia de arsenopirita.....	120
Figura N° 3-41: Mineralogía de la zona de Santa Filomena.....	121
Figura N° 3-42: Porcentaje de entrega de mineral con baja ley	123
Figura N° 3-43: Relación de Au/Ag mayor a 1	126
Figura N° 3-44: Relación de Au/Ag menor a 1	127
Figura N° 3-45: Minerales de la relación de Au/Ag	127
Figura N° 3-46: Fases brillantes de mineral	128
Figura N° 3-47: Mineral, muestra y color.....	131
Figura N° 4-1: Muestras para la investigación	134
Figura N° 4-2: Comparación de muestras de investigación.....	135
Figura N° 4-3: Almacenamiento de muestras de investigación.....	135
Figura N° 4-4: Camiones con mineral de labores de cateo libre	136
Figura N° 4-5: Etapas del muestro automático	137
Figura N° 4-6: Cuarteador automático.....	137
Figura N° 4-7: Clasificación de compósitos de mineral	139
Figura N° 4-8: Compósitos clasificados por color.....	139
Figura N° 4-9: Pareto de zonas que aportan en tonelaje.....	140

Figura N° 4-10: Pareto de zonas que aportan en oro recuperado	141
Figura N° 4-11: Pareto del tonelaje aportado en el mes de evaluación	142
Figura N° 4-12: Pareto del oro recuperado en el mes de abril 2017	143
Figura N° 4-13: Diagrama de cajas de ley de oro de zonas	144
Figura N° 4-14: Diagrama de cajas de recup. metalúrgica de zonas	145
Figura N° 4-15: Método del picnómetro.....	148
Figura N° 4-16: Análisis de Au y Ag de los compósitos de mineral	150
Figura N° 4-17: Gravedad específica de los compósitos	153
Figura N° 4-18: Compósito de sulfuros antes del primer ataque ácido	154
Figura N° 4-19: Ataque con ácido nítrico del compósito de sulfuro +	154
Figura N° 4-20: Compósitos después de ataque de ácido nítrico	155
Figura N° 4-21: Compósito de sulfuros antes del segundo ataque ácido	155
Figura N° 4-22: Ataque con agua regia al compósito de sulfuro ++	156
Figura N° 4-23: Compósitos de sulfuros segundo ataque ácido	156
Figura N° 4-24: Disolución de minerales en ácidos	157
Figura N° 4-25: Soluciones filtradas después de cada ataque ácido.....	158
Figura N° 4-26: Diagrama de cajas de ley de oro por subcategorías.....	159
Figura N° 4-27: Distribución de leyes del Sulfuro +	161
Figura N° 4-28: Distribución de leyes del sulfuro + +	162
Figura N° 4-29: Distribución de leyes del sulfuro + + +	162
Figura N° 4-30: Distribución de leyes del sulfuro + + + +	162
Figura N° 4-32: Diagrama de cajas de recup. met. por subcategorías.....	165
Figura N° 4-32: Ley calculada de oro por compósito.....	168
Figura N° 4-33: Recup. Metalúrgica del oro calculada por compósito	169
Figura N° 4-34: Distribución de tonelaje por compósito.....	170
Figura N° 4-32: Análisis sensibilidad de ganancia por mes	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Procesamiento de información.....	23
Tabla 2-2: Operacionalidad de variables	25
Tabla 3-1: Producción de oro en la provincia de Pataz	27
Tabla 3-2: Subdivisión estratigráfica.....	38
Tabla 3-3: Rocas ígneas claras y oscuras	42
Tabla 3-4: Características mineragráficas de las rocas observadas	46
Tabla 3-5: Características de las alteraciones.....	48
Tabla 3-6: Minerales asociados al oro	57
Tabla 3-7: Factores que afectan a la recuperación metalúrgica.....	62
Tabla 3-8: Ampliaciones de la planta de beneficio	73
Tabla 3-9: Relación entre el método científico y epistemológico	111
Tabla 3-10: Minerales presentes en la paragénesis	121
Tabla 3-11: Relación de Au/Ag mayor a 1	126
Tabla 3-12: Relación de Au/Ag menor a 1	127
Tabla 3-13: Matriz de solución de minerales	133
Tabla 3-14: Notación Munsell por sub categorías.....	133
Tabla 4-1: zonas y sub zonas de aporte de mineral	142
Tabla 4-2: Comparación de leyes entre zonas de impacto	144
Tabla 4-3: Comparación de Recup. metalúrgica entre zonas	145
Tabla 4-4: Análisis químico de muestras de relave	151
Tabla 4-5: Gravedad específica de minerales reconocidos	152
Tabla 4-6: Porcentajes de disolución de compósitos.....	157
Tabla 4-7: Resultados del diagrama de cajas por subcategorías	160
Tabla 4-8: Resultados de la normalización de datos	163
Tabla 4-9: Distribución normal de ley por subcategorías.....	163
Tabla 4-10: Estadísticos de prueba.....	164
Tabla 4-11: Intervalo de confianza de ley de oro	164
Tabla 4-12: Datos normalizados para Recup. Met.	165
Tabla 4-13: Distribución normal de Recup. Met.	166
Tabla 4-14: Intervalo de confianza de Recup. Met.	166
Tabla 4-15: Resultados de los compósitos por color	167
Tabla 4-16: Matriz de zonas de impacto y compósitos	172

Tabla 4-17: Nombres de colores de las subcategorías.....	172
Tabla 4-18: Resumen de subcategorías	174

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: MUESTRAS DE INVESTIGACIÓN	190
ANEXO 2: TABLAS MUNSELL PARA ROCAS.....	196
ANEXO 3: HANDBOOK OF MINERALOGY	199
ANEXO 4: RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	210
ANEXO 5: ANÁLISIS ESTADÍSTICO SIN NORMALIZAR	212
ANEXO 6: ESTUDIO MINERALÓGICO POR FASES BRILLANTES	215

GLOSARIO

Concesión minera – Permiso o licencia que da el gobierno a una entidad, empresa o persona para realizar una exploración y/o explotación minera en un determinado terreno (Dávila Burga, 2011).

Mineral – Sustancia inorgánica u orgánica de propiedades físicas y químicas definidas, que permiten su diferenciación y reconocimiento (R. Bates and J. Jackson, 1984).

Minero Artesanal – persona o conjunto de personas naturales o jurídicas que se dedican habitualmente y como medio de sustento, a la explotación y/o beneficio directo de minerales, realizando sus actividades con método manuales y/o equipos básicos. Asimismo, poseer, por cualquier título, hasta un mil (1,000) hectáreas, entre denuncios, petitorios y concesiones mineras; o que hayan suscrito acuerdos o contratos con los titulares mineros según lo establezca el reglamento presente (T.U.O. Ley General de Minería. Artículo 91).

Minería informal – Actividad minera que es realizada usando equipo y maquinaria que no corresponde a las características de la actividad minera que desarrolla (Pequeño Productor Minero o Productor Minero Artesanal) o sin cumplir con las exigencias de las normas de carácter administrativo, técnico, social y medioambiental que rigen dichas actividades, en zonas no prohibidas para la actividad minera y por persona, natural o jurídica, o grupo de personas organizadas para ejercer dicha actividad que hayan iniciado un proceso de formalización conforme se establece en el presente dispositivo. (Decreto Legislativo N.º 1105)

Minería Ilegal – Actividad minera ejercida por persona, natural o jurídica, o grupo de personas, usando equipo y maquinaria que no corresponde a las características de la actividad minera que desarrolla (Pequeño Productor Minero o Productor Minero Artesanal) o sin cumplir con las exigencias de las normas de carácter administrativo, técnico, social y medioambiental que rigen dichas actividades, o que se realiza en zonas en las que esté prohibido su ejercicio. Sin perjuicio de lo anterior, toda actividad minera ejercida en zonas en las que esté prohibido el ejercicio de actividad minera se considera ilegal. Esta definición sustituye la definición de minería ilegal contenida en el Artículo 3º del Decreto Legislativo N° 1100 (Decreto Legislativo N.º 1105).

Ley – Contenido metálico del elemento económico en relación con el material trabajado, generalmente dado en porcentaje u onzas/tonelada (D. Farris, 1990).

Paco – Vocablo utilizado por los mineros artesanales para referirse a los minerales oxidados.

Pira – Vocablo utilizado por los mineros artesanales para referirse a los minerales sulfurados.

Sulfuro – Mineral caracterizado por la inclusión del metal en la estructura cristalina de un mineral de sulfuro (SPCC, Glosario 2017).

Óxido – La porción de un depósito de mineral dentro de la que se han oxidado los minerales de sulfuro, generalmente por el proceso de erosión superficial (SPCC, Glosario 2017).

Unidad Económica (UEA) – Agrupación de dos o más concesiones mineras incorporadas al Catastro Minero Nacional con carácter definitivo, de una misma clase de sustancia y de un mismo titular o cesionario minero, para el cumplimiento de sus obligaciones de producción (INGEMMET, 2017).

NOMENCLATURA

g/t	Unidad de gramos por tonelada métrica de un elemento o compuesto químico valioso, conocido también como ley del metal valioso.
% Rec. Met.	Porcentaje de recuperación metalúrgica obtenida en la planta de beneficio, cianuración directa.
H V/C	Notación del color estandarizado por H. Munsell en su sistema de colores. Donde H es matiz (hue), V es el valor (value) y C es el croma o (chroma).

INTRODUCCIÓN

Querer comprender los misterios que guarda la naturaleza es y será un constante desafío para el ser humano, a pesar del continuo avance de las ciencias y de contar con la más avanzada tecnología, siempre habrá fenómenos y observaciones que impactarán nuestros sentidos, despertarán la imaginación y avivarán la curiosidad por querer hallar respuestas que acrecienten nuestro conocimiento.

Compañía Minera Poderosa S.A. es una empresa de mediana minería, ubicada a 500 kilómetros de Lima, en la Provincia de Pataz; dedicada especialmente a la extracción de oro desde 1980. Dentro de la zona de sus concesiones mineras en que desarrolla sus operaciones, también trabajan mineros artesanales en “labores de cateo libre” que son gestionadas por el área de Acopio de la empresa. Los minerales aportados por esta actividad se han incrementado progresivamente y al ser procesados en la planta de beneficio presentan comportamientos aleatorios en las características y calidad del mineral aurífero. Con el presente estudio se buscó diseñar una herramienta práctica que facilite la caracterización in situ de este mineral, facilitando la toma de decisiones para su procesamiento y contribuyendo a mejorar la eficiencia y calidad en el proceso minero de su producto final.

El desarrollo de esta investigación contiene cinco capítulos: el capítulo I, Planteamiento y presentación de la oportunidad de investigación, se refiere a una breve descripción de la actividad minera en el Perú y las operaciones de Compañía Minera Poderosa S.A., donde a partir de ello se describe el problema de estudio y se define el objeto de la investigación con su justificación correspondiente.

El Capítulo II, Fundamentos Metodológicos, define la metodología a aplicar y el desarrollo del proceso de investigación en sus distintas fases junto con los objetivos del estudio. En el Capítulo III, describe el Marco Teórico que, además de informar sobre estudios previos y relaciones con el tema de estudio, expone los lineamientos teóricos que sirven de sustento a la presente investigación, así como también una breve presentación de los aspectos históricos y organizacionales de Compañía Minera Poderosa S.A.

Los resultados, producto de la investigación, es la conjugación de teoría y práctica para probar la hipótesis del estudio, en el Capítulo IV, se explica de manera detallada y clara los procesos de implementación del sistema de colores que forman parte de la metodología de investigación; se detallan las características de las muestras, su procesamiento, las pruebas aplicadas, los resultados obtenidos y se describen los métodos para caracterizar cada mineral catalogado por el sistema Munsell. Se realiza, además, la identificación de las zonas de extracción de mayor aporte para la compañía,

definiéndose las zonas de impacto y se dan también algunas orientaciones sobre la aplicabilidad del estudio.

Finalmente, el Capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones producto del estudio realizado, dejando la puerta abierta para la continuidad del mismo y/o investigaciones posteriores afines.

En síntesis, la presente investigación tiene una gran importancia debido a la simplicidad de uso del sistema Munsell, mediante norma ASTM, para estimar leyes de oro en gramos por tonelada y porcentaje de recuperación metalúrgica con cierto grado de confiabilidad, lo cual permitirá tomar de decisiones in situ, ahorrando no sólo tiempo hasta obtener los resultados oficiales sino clasificando los minerales según sea éste su comportamiento refractario lográndose obtener el mayor contenido de oro fino global y, además de conocer las características del relave.

La aplicación del estudio a otras minas del batolito de Pataz es posible siempre y cuando el mineral extraído sea de manera selectiva, pues la dilución y granulometría de extracción influye en la coloración del mineral.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO Y PRESENTACION DE LA OPORTUNIDAD DE INVESTIGACION

1.1 Antecedentes generales

La actividad minera aurífera en el Perú es una labor que se lleva a cabo desde la existencia de las civilizaciones pre – incas; hoy por hoy esta actividad es la que más destaca en términos de aporte al PBI (BCRP, 2017).

La labor de extracción y procesamiento es realizada por empresas de capital nacional y/o internacional. Entre éstas podemos mencionar a la Compañía Minera Poderosa S.A., ubicada en la Provincia de Pataz, que, desde su fundación en 1980, está dedicada a la extracción y procesamiento de oro. Su participación en la producción nacional de oro, según las (Estadísticas - Producción Minera, s.f.), se mantuvo menor al 2% hasta el 2009 con un 1.79%. Sin embargo, a partir de ese año empezó a tener mayor actuación llegando a representar el 4.33% en el 2016 ver *Figura N° 1-1*; este aumento significativo tiene una correlación con el aporte de los minerales provenientes de “Labores de Cateo Libre” (CL) y Labor Asignada (LA), las cuales se encuentran dentro de las concesiones mineras que tiene a cargo de Compañía Minera Poderosa S.A..

Figura N° 1-1: Producción anual nacional de oro de Minera Poderosa

Así pues, Compañía Minera Poderosa S.A. es dueña de 114,010 ha de concesión minera, en las que existe presencia de minería artesanal e informal; lo cual para erradicar este último la empresa implementó lo prescrito en la Ley 27651 del 2002, “Ley de formalización y promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal”, con el fin de formalizar a los mineros que estaban dentro de su concesión, evitando así la contaminación del medio ambiente, debido al mal uso de sustancias peligrosas como cianuro y mercurio; además de luchar contra el trabajo infantil, fomentar empleo formal y recuperar el oro que, según ley, corresponde a las concesiones de Poderosa.

Al respecto, Compañía Minera Poderosa S.A. por medio del área de Acopio de Mineral, comenzó a acumular los minerales provenientes de los Mineros Artesanales (MA) formalizados y en vías de formalización. Esta área organizacional se encargó de administrar las labores de Cateo Libre (CL), constituidas por labores de exploración y explotación partir de los afloramientos; y la Labor Asignada (LA), que se refiere a la recuperación de pilares no económicamente rentables para ser extraídos por parte de la compañía.

Estos minerales, en tonelaje han tenido un crecimiento sostenido año a año, logrando representar en el 2016 el 25% de todo el material tratado en la planta de beneficio y en términos de onzas de oro procesadas el 40% del total, en conjunto entre estas dos labores. El *Figura N° 1-2* muestra la evolución del tonelaje del área de acopio de mineral desde el año 2002 hasta el 2016.

Figura N° 1-2: Tonelaje del área de Acopio

1.2 Descripción de la problemática

Entre las dos labores que administra el área Acopio de la Compañía, la de mayor impacto es la de Cateo Libre (CL), pues su contribución asciende al 87.5% de toda la producción de esta área; en el año 2016 el tonelaje de las labores de cateo libre ascendió a las 93,852 toneladas métricas. Para este mismo año, el aporte en tonelaje del área de acopio representó el 25% del tonelaje total procesado por la planta de beneficio de la compañía, y dicha aportación ha ido en aumento constante desde el 2009; ver *Figura N° 1-3*.

Teniendo en cuenta que el producto final a comercializar en el mercado internacional son las onzas de oro obtenidas, el aporte en conjunto de las labores de Cateo Libre y Labor

Asignada, representa aproximadamente el 40 % del total de oro fino producido por la Compañía, tendencia que se ha mantenido en los últimos 3 años (ver *Figura N° I-4*).

Figura N° I-3: Aporte en tonelaje de mina y acopio

Fuente: Memorias anuales. Compañía Minera Poderosa S.A.

Sin embargo, cuando el mineral así obtenido es procesado en las dos plantas de beneficio de la compañía, con el fin de obtener oro bullón, éste presenta baja recuperación metalúrgica en comparación con los que provienen de las operaciones de mina ver *Figura N° I-6*, lo que indica que un porcentaje se está yendo en el relave, hecho que afecta directamente la obtención de finos de oro comercializables.

Figura N° I-4: Aporte en onzas de oro de mina y acopio

Fuente: Memorias anuales. Compañía Minera Poderosa S.A.

El siguiente Figura permite comparar el aumento de las leyes de oro y los porcentajes de recuperación metalúrgica del mineral obtenido por labores de operaciones mina y del área de acopio.

Figura N° 1-5: Ley de oro de operación mina y acopio

Fuente: Memorias anuales. Compañía Minera Poderosa S.A

Figura N° 1-6: Recuperación metalúrgica de mina y acopio

Fuente: Memorias anuales. Compañía Minera Poderosa S.A.

De acuerdo con las memorias anuales de Compañía Minera Poderosa S.A., el mineral obtenido por medio del área de Acopio Mineral presenta elementos contaminantes y condiciones que hacen que el mineral sea refractario, razón por la cual la recuperación metalúrgica es más baja.

*“**Planta Marañón:** La extracción total en la planta Marañón ha sido de 89.31% menor en 1.61% frente al 2015, debido a que el aporte de mineral de UEA Poderosa ha sido reemplazado por el aporte de UEA Libertad (aumentó de 29% a 39%) mientras que el aporte de Acopio se ha mantenido en 27%. Estos minerales de la Zona Sur y de Acopio tiene menor extracción que los minerales de la zona norte, por el mayor contenido de Plata y Arsénico, que los hacen más refractarios”¹.*

*“**Planta Marañón:** La extracción total en la planta Marañón se redujo en 1.36% frente al 2014, debido al incremento de aporte de mineral de acopio en 21% respecto al año 2014 y a la reducción de la ley de mineral de acopio de 33.08 a 27.57 gr/t”².*

De las concesiones mineras que tiene, en el distrito de Pataz, Compañía Minera Poderosa S.A. se encuentra dentro de un yacimiento de tipo orogénico, en donde el mineral aurífero está emplazado en rocas intrusivas del Batolito de Pataz, acompañadas por rocas metavolcánicas de la formación Vijus, rocas metamórficas de la Formaciones Contaya y las del Complejo Marañón, es por demás lógico que la mineralogía varíe, ya que son rocas muy antiguas y han pasado por muchos eventos geológicos. Debido a esto, el comportamiento del mineral que se desea extraer estará acompañado de minerales contaminantes y/o confiriéndole la condición de refractariedad. Siendo esta la razón por la que la recuperación metalúrgica no llegue a ser eficiente con el proceso actualmente empleado, además de presentarse variación de las leyes promedios de todos los minerales provenientes de dichas labores.

¹ Cfr. Memoria Anual 2015. CIA PODEROSA

² Cfr. Memoria Anual 2014. CIA PODEROSA

La llegada de estos minerales a la planta de beneficio está programada por el área de Acopio, que informa el lugar de procedencia de los mismos y hace un estimativo sobre sí la ley (contenido de oro) es baja, media o alta. Al llegar a la planta de beneficio, el mineral se procesa en las siguientes doce horas mínimo, después de ser triturado y muestreado; las muestras sirven para determinar la ley o contenido de oro, recuperación metalúrgica mediante el método de cianuración directa, procedimiento que tiene un tiempo mínimo de respuesta de tres días; en dicho tiempo, el mineral que ingresó a la planta ya ha sido procesado y se encuentra en la relavera. Se puede ver, entonces, que no existe un proceso de caracterización previa del mineral a procesar, lo cual repercute directamente en la variación de las leyes o contenido de oro y la recuperación metalúrgica del proceso en general, causando un aumento en la cantidad de oro en el relave. En el siguiente Figura se esquematiza la causa y efecto del procesamiento de los minerales de cateo libre, debido a la falta de caracterización del mineral.

Figura N° 1-7: Esquema de causa y efecto problema

Fuente: Elaboración propia.

1.3 Objeto de la investigación

Debido a que los minerales obtenidos en labores de cateo libre por el área de Acopio de Compañía Minera Poderosa S.A. en la Provincia de Pataz presentan diferentes intensidades de coloración, que van desde un tono claro a oscuro dependiendo de su mineralogía; el objeto de estudio de la presente tesis será la correlación entre el color de cada muestra de mineral extraída y entregada a la planta de procesamiento; y las características mineralógicas propias que determinan su beneficio mineral.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 General

Caracterizar minerales auríferos, provenientes de labores de cateo libre, previo a su procesamiento mediante el uso del sistema de color de Munsell para optimizar la planificación del proceso metalúrgico y mejorar la recuperación de finos de oro.

1.4.2 Específicos

- Determinar, mediante pruebas metalúrgicas, la correlación entre el color estándar de muestras de mineral con la mineralogía propia de las mismas, con el propósito de hacer más efectiva su caracterización.
- Determinar, por medio de ensayos químicos, la reciprocidad entre el color estándar de muestras de mineral con el contenido metálico de oro de las mismas, como medio para su caracterización previa al procesamiento.
- Determinar, a través del método de cianuración directa, la correspondencia entre el color estándar de muestras de mineral y su porcentaje de recuperación metalúrgica, de forma que se logre su caracterización antes del procesamiento.

1.5 Justificación

Compañía Minera Poderosa S.A., como toda empresa extractiva y comercial, debe mantener un proceso de mejoramiento continuo que le permita optimizar sus operaciones de exploración, explotación, procesamiento y producción; razón por la cual todos los esfuerzos que se haga en pro de hacer más eficientes los procesos y de lograr resultados más efectivos, deben ser incentivados, implementados y apoyados por todas las áreas de la empresa, ya que esto redundará en beneficios económicos, técnicos y sociales, no solo para la empresa sino también para todos los involucrados, directa o indirectamente, con ella.

Algunas de las razones que justifican la implementación de este estudio y sus resultados, en la Compañía Minera Poderosa S.A. y su área de influencia, son:

- La caracterización in situ de los minerales provenientes de labores de Cateo Libre que se realizan en las concesiones mineras que tiene la Compañía, generará mayor eficiencia en la gestión de los mismos y en términos de comportamiento mineralógico se podrá realizar una mejor clasificación y selección de estos minerales.
- Incremento de la rentabilidad de la operación de Compañía Minera Poderosa S.A., ya que la caracterización previa al procesamiento brindará información sobre el porcentaje estimado de recuperación metalúrgica, calidad del producto a obtener y control de parámetros en el proceso de beneficio.
- Caracterización y almacenamiento planificado del relave a obtener de los minerales de baja recuperación metalúrgica y alta ley de oro. Incrementándose, así, los “recursos minerales medidos” de la compañía.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS METODOLOGICOS

2.1 Tipo de investigación

Para el desarrollo del presente estudio se requiere de un tipo de investigación con estas características:

- **De Campo:** se extraerán datos e informaciones directamente de la realidad a través de la observación y del uso de técnicas de recolección de información y de análisis experimental de muestras.
- **Cualitativa:** se basará en la obtención de datos, no cuantificables en un comienzo, basados en la observación y describirá las relaciones entre las diversas características físicas del conjunto mineral, especialmente el color y su comportamiento mineralógico.
- **Cuantitativa:** además de tener en cuenta el aspecto cualitativo del mineral, se estudiará y analizará éste a través de diferentes procedimientos basados en la medición, buscando obtener explicaciones que será confrontadas con la hipótesis. Debido a esta característica los resultados pueden ser fundamentados en la estadística y ser generalizables.
- **Aplicada:** Debido a que la investigación aborda un problema específico; la investigación está centrada en encontrar mecanismos para lograr un objetivo determinado.

- **Descriptiva:** se busca establecer una descripción lo más completa posible de la correlación entre el color de las muestras minerales con el contenido de oro como, además, del porcentaje de recuperación metalúrgica del mismo.
- **Explicativa:** se hará uso de diferentes métodos, como la del método observacional, correlacional o experimental, con el objetivo de crear modelos explicativos en el que puedan observarse secuencias de causa-efecto para explicar la relación del color de las muestras con su caracterización mineralógica.

2.2 Metodología de investigación

La presente investigación utilizará una metodología teórica – práctica, del método científico, debido a su aplicación específica en la actividad minera; teórico al pretender demostrar la veracidad del uso del color como herramienta para caracterizar minerales. Asimismo, práctico porque se intenta dar uso en campo, in situ.

Por tal motivo, se partirá de una muestra representativa de una población, a la que se manipulará experimentalmente cada posible situación (variable controlada) para observar cambios que sean registrados y ver su comportamiento respecto al objeto de estudio. Para culminar con la prueba de hipótesis y lograr comprobar o rechazar la hipótesis planteada (C. Muñoz, 2011).

2.2.1 Población y Muestra

Población – El mineral aurífero entregado a planta de beneficio proveniente de labores de cateo libre en el yacimiento orogénico del distrito de Pataz, y que se encuentran dentro del área de las concesiones mineras de Compañía Minera Poderosa S.A.

Muestra – En primera instancia, se planteó el uso de una muestra probabilística, en donde se buscará una muestra aleatoria, considerando específicamente las entregas de minerales auríferos provenientes de labores de cateo libre a planta de beneficio de

Compañía Minera Poderosa S.A. durante un año. Por lo que, para determinar el tamaño óptimo de la muestra, se utilizó la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N \cdot z_{1-\alpha/2}^2 \cdot p \cdot q}{(N - 1) \cdot \varepsilon^2 + z_{1-\alpha/2}^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

N = Cantidad total de entrega de mineral, proveniente de labores de cateo libre

recibido durante el año 2017 (N = 4344)

α = Nivel de significancia ($\alpha=0.05$)

Z= valor de la abscisa de la curva normal para la probabilidad del 95% de confianza

($z_{1-\alpha/2} = 1.96$)

p = Proporción de entrega de mineral que influye en la variable que buscamos medir.

(p=0.50)

q = Proporción de entrega de mineral que poco influyente con la variable a medir

(q=0.50)

ε = Error muestral ($\varepsilon = 0.05$)

n = Tamaño óptimo de la muestra

$$n = \frac{4344 \cdot (1.96)^2 \cdot (0.50) \cdot (0.50)}{(4344 - 1) \cdot (0.05)^2 + (1.96)^2 \cdot (0.50) \cdot (0.50)}$$

n = 353 entregas de mineral provenientes de labores de cateo libre

Por lo tanto, la cantidad mínima adecuada de entrega de minerales, como muestra, es

353 con un nivel de confianza del 95% y un error muestral del 5%.

Por otro lado, como complemento para el cálculo de la muestra a estudiar se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos

- Número total de embarques de mineral, provenientes de labores de cateo libre, recibidos durante el año 2017 4344
- Promedio de embarques al mes362
- Promedio de embarques diarios12,06.....(13)

De acuerdo con esto, y buscando que los resultados de las muestras analizadas sean representativos y generalizables al resto de la población se llevará a cabo el siguiente plan de muestreo:

- Muestras diarias tomadas para análisis13
- Muestras tomadas durante un mes.....390

Si se tiene en cuenta que se analizarán muestras de todos los embarques diarios que se reciban durante un mes, es decir, se analizará todo el mineral recibido, se puede concluir que la muestra analizada es suficientemente representativa de la población objeto de estudio. Por lo tanto, del muestreo probabilístico que nos sugiere un tamaño de muestra de 353, en este estudio se realizará con 392 muestras.

2.2.2 Instrumentos de investigación

Para la puesta en marcha de este estudio se hará uso de los siguientes instrumentos de investigación:

- Observación
- Entrevista
- Técnica documental (recopilación de información existente)
- Experimentación

2.2.3 Fuentes de información

Las fuentes de información para el presente proyecto serán recursos de procedencia de datos geológicos, técnicos y científicos; datos estadísticos de producción y cotización; Además, de visita a campo y entrevistas a ingenieros de la compañía. Todo ello, ayudará en la construcción de la investigación. Asimismo, de Tesis doctorales realizados en la compañía y de revistas y artículos científicos reconocidos.

2.2.3.1 Información primaria

- Visita, observaciones en campo
- Realización de pruebas en laboratorio de la compañía
- Base de datos y memorias anuales de la compañía
- Estadísticas del Ministerio de energía y minas entre otros.
- Base de datos de precios internacionales.

2.2.3.2 Información secundaria

Las fuentes de información secundarias se obtienen a partir de buscadores de información académica como One Mine, Elsevier, Springer Link. Base de datos de Tesis Doctorales. Artículos de revistas como: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME); Society of Economic Geologists (SEG); Ore Geology Reviews; Australian Journal of Earth Sciences; International Journal of Mineral Processing. Asimismo, libros reconocidos de minería del mundo y marco legal de la minería peruana.

2.3 Diseño y proceso de investigación

El tiempo estimado para la realización del presente trabajo es de diez meses; el trabajo de recolección de información se llevará a cabo en las áreas de Acopio de Mineral, Geología, Mina, Planta de Beneficio, Laboratorio Químico y Laboratorio Metalúrgico, las cuales pertenecen a las unidades de producción Santa María y Marañón.

La presente investigación se desarrollará en cinco fases consecutivas, la cuales son descritas a continuación:

Figura N° 2-1: Diseño de la metodología

Fuente: Elaboración propia

2.3.1 Fase I – Datos iniciales

Esta fase hace referencia al proceso de recolección de información el cual incluye las siguientes actividades:

- Entrevista con los directivos de la Compañía Minera Poderosa para dar a conocer el proyecto y solicitar su aprobación y apoyo.
- Consulta de literatura referente al tema de investigación y de información documental y estadística de Compañía Minera Poderosa S.A.

- Delimitación y descripción de la zona de estudio (descripción de la formación del yacimiento, de la zona geográfica y las condiciones geológicas, mineras, metalúrgicas y químicas que existen en la zona).

2.3.2 Fase II – Muestreo

La identificación de cada mineral aurífero proveniente de una labor de cateo libre que se entrega al área de planta de beneficio es comunicada por el área de Acopio de la compañía un día antes de ser enviado. Cuando el camión o embarque del mineral llega a la planta, inicialmente son pesados y luego dirigido a la operación de trituración con el fin de reducir de tamaño, ya que esto influye en la representatividad de la muestra (Ver 3.3.6 *Muestreo* y representatividad). Al tener el tamaño de partícula menor a 3/8” de diámetro, por medio de fajas transportadora es enviado a una tolva de finos para su posterior procesamiento. Antes de que el cargamento ingrese a la tolva, el mineral es muestreado por un cuarteador automático (Ver 4.1.2 *Representatividad de las muestras* obtenidas). Adicionalmente, el material muestreado es dividido aleatoriamente mediante tres rifles o cuarteadores “Jones”, uno después del otro, con el objetivo de obtener seis muestras representativas. Una de estas, es la que se entrega a laboratorio metalúrgica para sus análisis oficiales de contenido o ley de oro y su recuperación metalúrgica. De manera que, esta muestra procesada será la muestra con lo cual se trabajará.

2.3.3 Fase III – Procesamiento de datos

Teniéndose en cuenta que, cuando el mineral llega a planta de beneficio, cada cargamento presenta una intensidad de coloración acorde a su mineralogía, lo cual se manifiesta del mismo modo en la muestra representativa obtenida por el cuarteador automático. De esta, cuando parte de ella ingresa a la prueba de recuperación metalúrgica mantiene su misma característica. Por lo que, el producto de estas

muestras será recopilada y almacenada para luego clasificar y caracterizar a estos minerales entregados mediante el uso de las tablas de colores Munsell para rocas (Ver 4.1.3 *Uso del sistema Munsell para clasificación de mineral*). Aquí, cada mineral aurífero entregado tendrá un nombre estandarizado, evitándose así la subjetividad. La medición del color se realiza a las doce horas (12:00), luz del día, tal como lo sugiere la norma ASTM (Ver 3.5.2.3 *Medición del color*) de manera manual. Por ejemplo, sea la muestra entregada número 390, la cual responderá al color 5G 2/1. A partir de este nombre estandarizado se realizan compósitos de mineral lográndose dividir en dos categorías, óxidos y sulfuros, de las cuales se subdividen en cuatro subcategorías acorde a la intensidad de su coloración. Obteniéndose cuatro muestras de óxidos y sulfuros, haciendo un total de ocho muestras de compósito de mineral más una muestra promedio, la cual es la mezcla de todas las muestras sin ninguna condición. De estas, se realizarán los ensayos químicos y pruebas metalúrgicas para probar la hipótesis planteada.

Figura N° 2-2: Modelo de medición de color

Fuente: (Munsell Color, 2009)

2.3.4 Fase IV – Análisis de datos

De los compósitos minerales generados se realizaron ensayos químicos; para determinar su contenido de oro y plata; y pruebas metalúrgicas como gravedad específica y ataques con ácidos. Todo ello, para corroborar la existencia de una correlación que pruebe la hipótesis planteada. Por tal motivo, se usó el método científico, el cual se basará en el inductivo – deductivo, para comprobar si el color del mineral responde a un comportamiento mineralógico, contenido de oro y porcentaje de recuperación metalúrgica. En este apartado se apoyará en la estadística de la siguiente manera:

- **Estadística descriptiva** – Se tratará de describir las características de cada compósito generado mediante diagrama de Pareto, diagramas de cajas y medidas de dispersión.
- **Estadística inferencial** – Se buscará inferir sobre la ley de oro y la recuperación metalúrgica de cada subcategoría de compósitos minerales con cierto nivel de confianza.

2.3.5 Fase V – Informe final

Esta fase corresponde a la elaboración del informe final de la investigación en donde se presentan los resultados de las fases precedentes y se concluye con la presentación de la prueba de la hipótesis de investigación.

2.4 Procesamiento de la información

La información crucial para esta investigación se obtendrá, como se dijo anteriormente, de fuentes primarias a través de visitas técnicas realizadas a las unidades de extracción de Santa María y Paraíso, y la Planta de Procesamiento de Marañón – Vijus; aquí se realizará trabajo de campo en geología y mina en las labores de Cateo Libre (CL) como también ensayos químicos y pruebas metalúrgicas con los minerales entregados a planta de beneficio. De igual forma se realizarán consultas a los profesionales de cada área que laboran en la Compañía. Todo esto, con el fin de aumentar el conocimiento del objeto de estudio, coloración del mineral, para predecir la información mineralógica respecto a esta propiedad organoléptica in situ y tomar una decisión para su beneficio mineral.

Se parte de los hechos de los resultados oficiales que emite el laboratorio metalúrgico respecto a la ley de oro (g/ton) y la recuperación metalúrgica (%) de cada entrega mineral proveniente de labores de cateo libre, la cual se verifica que se emplaza en un yacimiento tipo orogénico en el batolito de Pataz. Se realiza la clasificación de colores mediante el uso de las tablas Munsell para separarlos por mineralogía, óxido y sulfuros, y su intensidad de color formando compósitos de mineral. Luego de realizar los ensayos y pruebas requeridas los resultados se procesan de manera inductiva, en la que se analiza cada subcategoría de mineral clasificado por la tabla Munsell, donde cada subcategoría está conformada por un conjunto de minerales de las mismas características organolépticas. Se hace uso de la estadística descriptiva para identificar sus características mediante diagrama de cajas, del cual se obtiene una visión de la simetría de la distribución de datos, valores atípicos, máximos, mínimos, percentiles 25 y 75 para visualizar el 50% de datos; asimismo, de las medidas de dispersión como: la media, mediana, coeficiente de asimetría y curtosis. De esta información, se obtiene una primera correlación del color de mineral con los parámetros de ley de oro (g/ton) y recuperación metalúrgica (%) por

cada subcategoría de compósito mineral. El siguiente paso es, una vez demostrado que existe una correlación, proceder de manera deductiva, en la que se hará uso de la estadística inferencial, para obtener un intervalo de confianza al 95%. Por lo que, de la información obtenida, de la manera inductiva, se procede a la normalización de datos con el fin eliminar datos que afecten a la distribución normal, esto es haciendo que el coeficiente de asimetría se menor a uno y que la curtosis se mantenga alrededor de cero. Para tal caso, se hace uso de histogramas y curva de distribución normal logrando una nomenclatura de la forma $X \rightarrow N(\mu, \sigma)$. Luego, teniéndose en cuenta el número de datos se aplicará los estadísticos de prueba, $Z_{1-\alpha/2}$ o $T_{1-\alpha/2}$, para encontrar con un 95% de confiabilidad un intervalo de confianza de cada parámetro respecto al color de mineral de cada compósito. De manera que, a partir de cada de mineral aurífero, entregado a planta de beneficio que provenga de labores de cateo libre, sus parámetros mineralógicos serán estimados por su color mediante el uso de la tabla Munsell con un 95% de confianza. Todo el procesamiento se realizó con el programa Excel de Microsoft office 2016.

Tabla 2-1: Procesamiento de información

Categoría	Subcategoría	Ensayos y pruebas	Estadística descriptiva	Normalización de datos	Estadística Inferencial
Óxido	Óxido +	<ul style="list-style-type: none"> •Ley de oro y plata (g/ton) •Gravedad específica •Prueba de ataque ácido 	<ul style="list-style-type: none"> •Distribución de datos •Medidas de dispersión •Coeficientes de asimetría 	<ul style="list-style-type: none"> •Ajuste de coeficientes de asimetría •Histogramas y curva de distribución normal $X \rightarrow N(\mu, \sigma)$ 	<ul style="list-style-type: none"> •Uso de estadísticos $Z_{1-\alpha/2}$ o $T_{1-\alpha/2}$ •Determinación de intervalo de confianza al 95%
	Óxido ++				
	Óxido +++				
	Óxido ++++				
Sulfuro	Sulfuro +	<ul style="list-style-type: none"> •Ley de oro y plata (g/ton) •Gravedad específica •Prueba de ataque ácido 	<ul style="list-style-type: none"> •Distribución de datos •Medidas de dispersión •Coeficientes de asimetría 	<ul style="list-style-type: none"> •Ajuste de coeficientes de asimetría •Histogramas y curva de distribución normal $X \rightarrow N(\mu, \sigma)$ 	<ul style="list-style-type: none"> •Uso de estadísticos $Z_{1-\alpha/2}$ o $T_{1-\alpha/2}$ •Determinación de intervalo de confianza al 95%
	Sulfuro ++				
	Sulfuro +++				
	Sulfuro ++++				

Fuente: Elaboración propia

2.5 Determinación de la hipótesis de trabajo

La hipótesis para la presente tesis es:

“La aplicación del sistema de color Munsell, permitirá caracterizar los minerales auríferos provenientes de labores de cateo libre previo a su procesamiento en planta de beneficio incrementado las onzas de oro”

2.5.1 Identificación de variables de estudio

Acorde a lo que se quiere comprobar, si el color del mineral puede caracterizar un mineral tendremos las siguientes variables.

2.5.1.1 Variable Independiente

- **El color de mineral**, pues se evaluará su capacidad de influencia en otras variables, dependientes. Tendrá una notación de la forma H V/C, el cual se refiere a los tres parámetros del color: matiz (Hue), valor (Value) y croma (Chroma).

2.5.1.2 Variable Dependientes

Serán aquellas que cambien como consecuencia de la manipulación de la variable independiente (Color del mineral).

- **Tipo de Mineral**, sea este óxido o sulfuro
- **Contenido de mineral o ley de mineral**, el contenido de oro por una tonelada métrica de mineral.
- **Recuperación metalúrgica**, porcentaje de recuperación obtenida después del proceso metalúrgico.

2.5.2 Operacionalidad de las variables

La operacionalidad de las variables estarán en función a estándares de color en el caso de la variable independiente. Asimismo, en el caso de las variables dependientes sus métodos de análisis se usarán las que se utiliza en las instalaciones de Compañía Minera Poderosa S.A., sea del laboratorio metalúrgico como el químico.

Tabla 2-2:Operacionalidad de variables

Variable	Descripción	Dimensión	Indicador
Independiente	Color	H V/C	Uso de las tablas de color de Munsell para rocas Medición a la luz del día
Dependiente	Tipo de Mineral	Óxido/Sulfuro	Inspección visual, color característico. Tono rojo, óxido; y tono oscuro, sulfuro
Dependiente	Ley de Mineral	g Au/ton	Contenido de oro, en gramos, por una (01) tonelada métrica de mineral. Método de análisis "Ensayos al fuego"
Dependiente	Recuperación Metalúrgica	% Recup. Met	Porcentaje que se puede recuperar el oro del proceso metalúrgico. Método de cianuración directa.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO III

MARCO TEORICO, ESTADO DEL ARTE Y MARCO REFERENCIAL.

3.1 Marco histórico

En el décimo boletín de Minera Poderosa, “EL BATOLITO” (2005), el artículo “Antecedentes Históricos de la Explotación de Oro en la Provincia de Pataz” narra cómo fue la actividad minera desde la época Pre Inca e Inca. En la obra de los arqueólogos H. Rosas y M. Ríos titulada “Minería y Metalurgia en el antiguo Perú” señala a Pataz como zona céntrica aurífera de importancia para los incas y civilizaciones pre incas. Asimismo, Von Hagen, sostiene que el oro de los Mochicas fue adquirido en las partes altas del Perú, refiriéndose a dicha provincia.

En la provincia de Pataz, se encuentran los pueblos de Pataz, Parcoy y Buldibuyo, destacándose el segundo. Puesto que, se encontró los llamados, así por los españoles, quimbales, bimbaletes o bambaletes. Aparatos, que eran como molinos o molinetes líticos, inventados por los peruanos de las civilizaciones pre incas, los cuales consistían en dos piezas estilo “Batán” donde la parte superior se movía por la acción de los pies, causando un sistema de vaivén sobre la parte inferior fija, logrando la trituración y molienda del mineral. Asimismo, cabe resaltar que el método de recuperación del metal dorado se logró mediante el uso del azogue o mercurio y plantas del lugar llamadas Huarincha, Choloque y Shirag, los cuales tenían como finalidad impedir que el mercurio

se pierda durante la acción de la molienda. El oro que quedaba con el mercurio en amalgama era filtrado en una manta llamada “choleta” y la masa semisólida obtenida era llevada a fundición, donde el mercurio se vaporizaba y se obtenía el oro libre.

En el Virreinato, Carlos Basadre sostiene que durante la Conquista y el Virreinato los aventureros llegaron a la provincia de Pataz en busca del metal dorado empleando el método que utilizaban los nativos. Para este entonces, se llegó a descubrir las minas de mercurio en Huancavelica y posiblemente fueron utilizados en Pataz para la amalgamación. No obstante, los peruanos de estas tierras ya conocían el método de obtención con mercurio y para lo cual empleaban el mineral de cinabrio obtenido de las minas que existían en Buldibuyo, así lo atestigua Cabrera La Rosa. Es de pensar que el mercurio traído desde Huancavelica incremento la minería en Pataz durante la época mediana y final del Virreinato.

(Y. Haeberlin et al, 2004), realizo un cuadro de producción de Oro en la provincia de Pataz durante el siglo 20, en la que cuenta con los distritos de Pataz, Parcoy y Buldibuyo.

Tabla 3-1: Producción de oro en la provincia de Pataz

Compañía	Distrito	Periodo	Toneladas	Ley	Producción de Oro	
			ton	g Au / t	Kg	oz
CIA Minera Poderosa	Pataz	1982-2000	2,127,361	13.66	29,060	934,307
Consorcio Minero Horizonte ¹	Parcoy	1990-2000			20,101	646,270
CIA Minera Aurífera Retamas ¹	Parcoy	1990-2000			36,712	1,180,350
CIA Aurífera Real Aventura ¹	Parcoy	1995-2000			519	16,701
Northern Perú Mining Smelting Co. ²	Pataz	1929-1947	910,800	30.00	22,572	725,718
CIA Aurífera Buldibuyo ²	Buldibuyo	1936-1960	1,435,500	11.00	13,613	437,658
Sindicato Minero Parcoy ²	Parcoy	1938-1960	2,227,500	12.00	23,760	763,913
Minería a pequeña escala ³	Pataz & Parcoy	1901-2000			39,116	1,257,620
Producción Acumulada					185,453	5,962,537

² Tonelaje calculado para 330 días por año con una producción de 120, 150 y 250 t/día para Northern Perú Mining Smelting Co., CIA Aurífera Buldibuyo y Sindicato Minero Parcoy respectivamente.

³ Producción de oro de la minería a pequeña escala (depósitos en vetas) fue estimado a 6,172 Kg para el periodo 1991-2000, y 360 Kg Au/año antes de 1991

Fuente: (Y. Haeberlin et al, 2004)

3.2 Marco organizacional

Compañía Minera Poderosa tiene como actividades principales la obtención de recursos minerales, minado y beneficio por el método de cianuración, precipitación y fundición para obtener el oro bullion. Estas actividades se basan en la gestión de políticas para desarrollar y lograr los objetivos planteados año a año, cumpliendo el plan a largo plazo y así alcanzar la misión y visión de la organización, generando valor agregado para los colaboradores, accionistas y sociedad peruana.

Figura N° 3-1: Visión, misión, principios y valores

Fuente: (CIA_Poderosa, Memoria Anual 2016)

El área de comercialización de Compañía Minera Poderosa S.A. afirma que:

“Poderosa exporta el total de su producción, en barras doré, a reputadas refinerías en el extranjero para su procesamiento. El producto refinado se vende a uno de los principales compradores de oro a nivel mundial”

Por tal motivo, la rentabilidad se encuentra en obtener el oro bullion. Asimismo, para lograr este objetivo es necesario la contribución de todas las áreas de la compañía y de su estructura organizacional.

El organigrama de la Compañía tiene una estructura funcional, puesto que las actividades son agrupadas según su función común desde el nivel inferior al superior de la organización. Es decir, en cada estructura se consolida los conocimientos y

habilidades humanas de valor para la organización (L. Daft, 2011). En nuestra investigación, el área de Acopio, la cual administra las labores de cateo libre, reporta directamente a la Gerencia General. Sin embargo, presenta una ausencia a nivel de gerencia Ver *Figura N° 3-2*.

Figura N° 3-2: Organigrama de la compañía

Fuente: (CIA_Poderosa, Memoria Anual 2016, 2017)

Respecto al sistema integrado de gestión (SIG). Poderosa es una empresa que está comprometida a:

- *Desarrollar el trabajo en equipo a través de los Círculos de Mejoramiento Continuo CMC y la práctica del COLPA (Clasificar, Ordenar, Limpiar, Prevenir y Autodisciplina) para su aplicación en el trabajo diario.*
- *Reconocer a sus grupos de interés, el derecho al progreso y contribuir para que sean ellos mismos, gestores de su desarrollo para mejorar su calidad de vida.*

La presente investigación se alineará a la Política del SIG, mediante la práctica del COLPA a un nivel operacional cumpliendo, asimismo, la Seguridad, Salud Ocupacional, Medio Ambiente y Calidad.

3.3 Marco contextual

3.3.1 Geología Regional

Para tener una idea general de la geología regional, presentaremos los principales tipos de rocas que se presenta en nuestra naturaleza. Estas son; las rocas ígneas, las cuales se deriva en intrusivas (plutónicas) y volcánicas; las rocas sedimentarias; y las rocas metamórficas.

Figura N° 3-3: Formación y tipo de rocas genéticas

Fuente: (S.K. Haldar, 2014)

(Y. Haeberlin et al, 2004) en su tesis doctoral, realizó un mapa geológico regional a partir de los trabajos realizados por (D. Schreiber, 1989) y (D. Schreiber et al, 1990).

Ver *Figura N° 3-4*.

El presente trabajo de investigación se enfocará en la línea roja, donde los mineros artesanales de las labores de Cateo Libre (CL) abarcan desde zona de Santa María hasta la zona de La Lima, logrando una distancia aproximada de 15 Km (línea roja) con dirección al Noroeste del plano. Asimismo, se puede observar que la zona mineralizada se encuentra en el intrusivo del Batolito de Pataz y que a su vez está delimitado superficialmente por Formación Contaya y la Formación Lavasen.

Figura N° 3-4: Plano de la Geología regional de la provincia de Pataz

Fuente: (Y. Haeberlin et al, 2004)

3.3.1.1 Geomorfología

(M. Gutierrez, 2008) lo define como el estudio de los fenómenos sobre y cerca de la superficie terrestre y asimismo de las interacciones entre varios tipos de materiales y procesos, implicando los sólidos, líquidos y gases. Es decir, el resultado de la superficie terrestre es debido a las interacciones de fuerzas endógenas y exógenas, en donde la primera es el producto de movimientos verticales fundamentalmente y la segunda, como consecuencia de continuas denudaciones, suma de procesos que dan como resultado el desgaste progresivo de la superficie terrestre por la acción de varios agentes naturales como la meteorización, erosión y otros, que tienden a reducir el relieve originado por la primera fuerza. Compañía Minera Poderosa S.A. se encuentra en la cordillera Oriental y específicamente en rocas intrusivas. Asimismo, ésta acompañado de rocas metamórficas y meta volcánicas como el complejo Maraón y la Formación Contaya generando la geomorfología vista en la siguiente figura.

Figura N° 3-5: Geomorfología de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2 Estratigrafía

La secuencia de capas o estratos que se han formado a través del tiempo geológico es estudiado por la estratigrafía, la cual tiene dos pilares fundamentales; la primera, de

los fósiles que marca la edad relativa de las capas; y, segundo, de las facies que determina la naturaleza y el origen de los materiales, entendiéndose como el conjunto de condiciones físicas, químicas, ambientales mediante las cuales se produjeron las deposiciones litológicas. (J. Aubouin et al, 1981) en su libro “Tratado de Geología – Paleontología, Estratigrafía” hace una relación entre la estratigrafía y la cronología. Estableciendo a la cronología como algo esencial para la geología, donde la estratigrafía ha permitido desde la antigüedad establecer una cronología relativa, hasta que aparecieron los métodos físicos (radiactividad), los cuales permitieron establecer una cronología absoluta que da precisión a la anterior. Donde la unidad de medida es el millón de años (Ma).

3.3.1.3 Geocronología

Cada suceso ocurrido en la tierra a través del tiempo geológico es estudiado por este campo, en donde hace uso de dos métodos para determinar la edad de las rocas, los cuales son: 1. Estratigráfico – Paleontológico, el cual establece la edad relativa, y 2. Radiométrico, donde se determina la edad absoluta. Este último, consiste en medición de la desintegración de elementos inestables. Dado que cada elemento radioactivo tiene un período de vida media definida. Es decir, sea un elemento radioactivo que posea la propiedad de transformarse en otro elemento de naturaleza química distinta. Esta transmutación se acompaña por la emisión de partículas. Por ejemplo, consideremos una roca o mineral que, en el momento de su cristalización, contiene uranio (U), pero no plomo (Pb), y el cual se va enriqueciendo de este en el tiempo. La proporción de Pb que aparece (Ns) con relación al uranio que queda (Ni) constituye un reloj geológico. (J. Aubouin et al, 1981, pág. 280)

Cualitativamente se observaría que el uranio, el elemento radioactivo, buscará su equilibrio hasta llegar a un átomo estable, que este caso es el Plomo (Pb)

Cuantitativamente se define como el decrecimiento exponencial de la masa

$N = N_0 e^{-\lambda T}$, donde N_0 es la cantidad presente en el origen y N es lo que existe en el tiempo T .

Para que un elemento radioactivo pierda la mitad de su masa, es necesario un tiempo

T , tal que haga a N igual a $N_0/2$, es decir: $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T}$, dando como resultado $1/2 = e^{-\lambda T}$.

Ordenando la expresión $\lambda T = \ln 2 = 0.6931$ y finalmente llevando a la expresión más simple $T = \frac{0.6931}{\lambda}$. Este tiempo T es el período del elemento (de semi desintegración)

o también llamado el tiempo de vida media.

Asimismo, para comprender el tiempo geológico, deberemos expandir nuestra concepción del tiempo. Porque, en geología se trabaja con períodos largos de tiempo: millones o miles de millones de años. Es decir, de los 4.500 millones de años de antigüedad de la Tierra, un evento que haya ocurrido hace 12 millones de años puede ser calificado de “reciente”. Es por ello, que la apreciación de la dimensión del tiempo geológico es importante, ya que muchos procesos son graduales que se necesitan enormes lapsos, antes de que se produzcan resultados significativos.

L. Eicher, es su libro “*Geological Time*” esquematiza todos estos millones de años de nuestro Planeta en una escala que nosotros podemos comprender. Por lo que, se cita el siguiente extracto de su obra.

“Comprimamos, por ejemplo, los 4.500 millones de años de tiempo geológico en un solo año. A esa escala, las rocas más antiguas que conocemos tienen fecha de mediados de marzo. Los seres vivos aparecieron en el mar por primera vez en mayo.

Las plantas y los animales terrestres emergieron a finales de noviembre y las

amplias ciénagas que formaron los depósitos de carbón florecieron aproximadamente durante cuatro días a principios de diciembre. Los dinosaurios dominaron la Tierra a mediados de diciembre, pero desaparecieron el día 26, más o menos a la vez que se levantaron por primera vez las Montañas Rocosas. Criaturas de aspecto humano aparecieron en algún momento de la tarde del 31 de diciembre y los casquetes polares más recientes empezaron a retroceder desde el área de los Grandes Lagos y el norte de Europa alrededor de 1 minuto y 15 segundos antes de la media noche del 31. Roma gobernó el mundo occidental durante cinco segundos, desde las 11 h 59,45 hasta las 11 h 59,50. Colón descubrió América tres segundos antes de la medianoche, y la ciencia de la Geología nació con los escritos de James Hutton pasado un poco el último segundo del final de nuestro memorable año”

Figura N° 3-6: Escala del tiempo geológico

Fuente: (E. Tarbuck et al, 2005)

Teniendo en cuenta la base teórica y los periodos geológicos (*Figura N° 3-6*), procederemos a describir las formaciones que se encuentran en nuestra zona de estudio, para ello nos apoyaremos en tesis doctorales y revistas científicas.

El Ing. Carlos Ore, en su tesis de Maestría “*Caracterización y Rol de la Fallas (E-W) Secantes en la Mineralización Aurífera Filoniana del Batolito de Pataz, Perú*”. En el apartado de geología regional sostiene que las características geológicas desarrolladas en la región están ligadas a la evolución estratigráfica y estructural de la cordillera oriental de los andes en el Norte del Perú, (*Figura N° 3-7*) conformado por la superposición de 3 ciclos: El **Precámbrico**, **Hercínico** y **Andino**.

En el **Precámbrico** constituye la base estratigráfica denominada como “*Complejo de Maraón*”, el cual se compone principalmente de esquistos, filitas y secuencias variadas de rocas meta volcánicas de tobas e ignimbritas, esta secuencia supera los 2000 metros de espesor, los que se aprecia en los márgenes del río Maraón.

En el **Paleozoico**: sobre el Complejo de Maraón se ubican rocas volcánicas conocidas bajo el nombre de **Serie Metavolcánica** o **Formación Vijus** a fines del ciclo Precámbrico y sobre ella se desarrollan el **ciclo Hercínico**, el cual abarca el periodo devónico y parte del carbonífero, con una secuencias turbidíticas de colores oscuros, sobre cientos de metros (Rivera, 1992) la que es reconocida como la **Formación Contaya** del Ordovícico, espacialmente se encuentran ubicadas en bordura externa del Batolito de Pataz (al Norte preferentemente en el flanco Oeste y al Sur en los dos flancos).

A inicios del **Carbonífero** empieza una sedimentación continental conocida como **Grupo Ambo** la que se compone de lutitas, areniscas y algunos horizontes de conglomerados formando secuencias superiores a los 300 metros, de mayor expresión en el sector occidental del valle de Maraón (Rivera, 1992). A fines del **Paleozoico** se

depositan areniscas y conglomerados de coloración rojiza a las que se les designa las molasas del Grupo Mitu entre el Pérmico y Triásico.

En el **Mesozoico**: la sedimentación del **ciclo Andino** comienza con las calizas y dolomitas de **Grupo Pucará** del **Triásico-Jurásico**, sobre yacen al **Grupo Mitu** u otras formaciones anteriores en discordancia angular con una potencia mayor a los 500 metros, la **Formación Goyllarisquizga del Cretáceo inferior** se caracteriza por areniscas con intercalaciones de material pelítico con una potencia entre 100 y 300 metros (Rivera, 1992), sobre ella con una potencia de 200 metros continua la **Formación Crisnejas** compuesta de margas y calizas de color marrón grisáceo (Benavides, 1956). En discordancia angular sobre la Formación Crisnejas se deposita la **Formación Chota** que consiste en lutitas (Rivera, 1992) de coloración rojiza por la que se les denomina "las capas rojas" del **Cretáceo superior**.

Una acumulación de rocas volcánicas mayor a 1500 metros de potencia de lavas andesíticos a riolíticos ocurridas en el **Terciario medio** conforman el denominado **Volcánico Lavasen**, el mismo que se depositan en discordancia angular sobre el Batolito de Pataz y el Complejo de Marañón (Schreiber, 1989).

En el **Cuaternario** se forman depósitos aluviales y fluvio-glaciares. Rivera (1992) reporta depósitos morrénicos sobre los 3500 metros sobre el nivel del mar. Por lo tanto, el Batolito de Pataz es el cuerpo intrusivo dominante en la región de forma lenticular alargada con orientación entre N330° y N340° con un buzamiento entre 60 y 70°. El contacto occidental con el Complejo de Marañón es generalmente fallado (Chávez, 1990).

Asimismo, (W. Witt et al, 2016) en su publicación presenta un diagrama donde se observa la geocronología del Batolito de Pataz desde su formación y su periodo de mineralización, en donde la edad de formación del Batolito de Pataz ocurre en 328.1

± 1.2 Ma (método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para biotita en granodiorita) y 325 ± 1.4 Ma (método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ muscovita en aplita) y la mineralización en el periodo de 314 ± 1.2 Ma (método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en mica blanca) (Ver Figura N° 3-9). Asimismo, Y. Haerberlin, en su tesis doctoral. Realiza un cuadro comparativo de los estudios realizados anteriores a él en el Batolito de Pataz y propone su modelo *Tabla 3-2*. Además, presenta una columna Litoestratigráfica *Figura N° 3-8*.

Tabla 3-2: Subdivisión estratigráfica

Área de Pataz y Parcoy		
Formación	Serie turbítica, compuesta por pizarras	Ordovícico Medio
Contaya	negras y alternacias de margas arenosas.	Ordovícico Temprano
	Cuarcita y piedra arenisca gris	
Formación	Lavas basálticas - andesíticas con menos	
	pizarras negras.	Ordovícico Temprano
Vijus	Flujos piro clásticos riolíticos y dacíticos	Cambriano Tardío
	Areniscas y conglomerados gris violáceo	
Complejo	Rocas poli metamórficas con	
Marañón	plegamientos de bajo grado compuestas	Cambriano Temprano
	de filitas, mica esquistos, gneis y capas	Proterozoico Tardío
	de grafito	

Fuente: (Y. Haerberlin et al, 2004)

Figura N° 3-7: Plano de los ciclos geológicos en PODEROSA

Fuente: (C. Ore, 2006)

Figura N° 3-8: Columna Litoestratigráfica de Pataz

Mississippian - Early Permian

Proterozoic - Late Ordovician

Fuente: (Y. Haeberlin et al, 2004)

Figura N° 3-9: Geocronología del batolito de Pataz

Fuente: (W. Witt et al, 2016)

3.3.2 Geología Local

En términos de: tiempo, espacio y procesos geológicos, es necesario definir algunos conceptos principales que se desarrollará en la presente investigación.

3.3.2.1 Litología

Es el estudio del origen, evolución y clasificación de las rocas. Para nuestro caso, nos centraremos en las rocas Ígneas, debido al batolito de Patáz por ser donde nos encontramos realizando la investigación. Así pues, la composición química de estas rocas está expresada por lo general como compuestos de: SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , MnO , P_2O_5 y TiO_2 . Donde el contenido de SiO_2 (óxido de silicio) es el más importante, puesto que este varía desde los 35% hasta los 80%, dando las condiciones de clasificar a la roca como “ácida” o “básica”, en términos de química de rocas, puesto que en términos químicos no aplica, porque no llevan iones de hidrógeno. (S.K. Haldar, 2014, pág. 98). Asimismo, se distinguen componentes “claros” y “oscuros” cuando observamos estas rocas ígneas.

Tabla 3-3: Rocas ígneas claras y oscuras

Minerales Claros: Compuestos por cuarzo y Feldespato, aluminosilicatos de:	Potasio $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ o $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ y de
	Sodio $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ o $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$; de
	Calcio $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ o $2\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$.
	Moscovita $\text{KAl}_2[(\text{OH})_2/\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ (mica clara).
Minerales oscuros: Silicatos de hierro y de magnesio (máficos).	Olivino $(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4]$;
	Piroxeno $\text{AB}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ donde A puede ser Mg, Fe y Al y B por Ca y Li;
	Anfibol $\text{A}_2\text{B}_5[(\text{OH}, \text{F})/\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$ donde A: Mg, Fe, Al, Mn, Ti, el Si puede sustituir parte del Al y B por: Ca, Na, K;
	Biotita (mica oscura) $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[(\text{OH})_2/(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}]$
	Clorita $\text{A}_6[(\text{OH})_8/(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}]$, donde A puede ser magnesio, hierro di y trivalente y manganeso.

Fuente: (W. Maresh, 1990)

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos clasificar a las rocas de acuerdo con su contenido de (SiO_2) como el siguiente Figura.

Figura N° 3-10: Mineralogía de rocas ígneas

Fuente: (E. Tarbuck et al, 2005, pág. 114)

Asimismo, Streckeisen presenta su clasificación de rocas magmáticas mediante el triángulo que lleva su nombre.

Figura N° 3-11: Clasificación de rocas de Streckeisen

Fuente: (W. Maresh, 1990, pág. 37)

En Poderosa, según (C. Ore, 2006) la litología se constituye de: **granodioritas**, **monzogranitos**, diques aplíticos³ y pegmatíticos⁴, los cuales corresponden a la serie ácida (*Figura N° 3-10*), mientras que: las **tonalitas**, **dioritas**, **microdioritas**, pertenecen a una serie intermedia con expresiones tardías de diques lamprófiros⁵ y de diabasa⁶.

Para una mayor visión de la litología se presenta el *Tabla 3-4*, en el que se observa las características de las rocas encontradas en el área de investigación. La secuencia ácida a la que se asigna al granito son las mayores componentes de la secuencia intrusiva de la región y de todo el Batolito de Pataz. Por lo que, las granodioritas son de mayor volumen, que en ocasiones se encuentran en gradación de tonalitas a granitos y monzogranitos. No obstante, es común observar contactos nítidos entre granodioritas con monzogranitos. Los diques de composición ácida y básica se emplazan paralelos y cortantes al conjunto de rocas predecesoras. Esto se presenta en el flanco Oeste del Batolito, en rocas meta sedimentarias y metavolcánicas pre carboníferas, mientras que una serie de derrames andesíticos a riolíticos terciarios cubren el flanco Este. Una serie de diques coetáneos a estos derrames de diferentes tallas se emplazan cortando las series intrusivas. Las vetas reconocidas; son: La Lima, la cual no aflora en superficie, Karola, Consuelo, Atahualpa. Sin embargo, también se reconocen afloramientos de estructuras mineralizadas en el flanco oriental del cuerpo intrusivo, próximas a los Volcánicos Lavasen en Santa María, Porfía en el área de Pataz.

³ Roca granítica generalmente filoniana de color claro, ácida y de componentes de cuarzo, feldespato alcalino y mica blanca (muscovita); de textura generalmente fina.

⁴ Similar al dique aplítico, sólo con la diferencia de textura granular.

⁵ Rocas ígneas ultrabásicas de colores oscuros debido a la presencia de minerales ferromagnesianos, biotita, leucita, piroxeno, anfíboles y olivino.

⁶ Roca volcánica de color oscuro o verde, compuesta por plagioclasas y piroxenos.

Figura N° 3-12: Plano de la Geología local de Poderosa

Fuente: (W. Witt et al, 2016)

Tabla 3-4: Características minerográficas de las rocas observadas

Litología	Textura	Mineralogía	
Granodiorita	Granular xenomórfica	Plagioclasas	35 - 45 %
		Feldespatos Potásico	15 - 35 %
		Cuarzo	30 - 45 %
		Bitotitas	2 - 8 %
		Hornblendas	0 - 1 %
		Circón, Allanita, Apatito y Opacos	>1%
		Patinas de carbonatos y sericita fina	0 - 3 %
Monzogranito	Granular xenomórfica Hipidiomórfica Poiquilitica	Ortosa	35 - 50 %
		Plagioclasea	20 - 40 %
		Cuarzo	25 - 45 %
		Cloritas y Bitotitas	2 - 5 %
		Hornblendas	0 - 1 %
		Allanita, Apatito, Rutilo, Círcón y	>1%
		Opacos	>2 %
		Patinas de sericita y carbonatos	
Diorita	Xenomórfica Poiquilitica	Plagioclasas	40 - 65 %
		Hornblendas	30 - 60 %
		Biotitas	5 - 20 %
		Ortosa	0 - 10 %
		Cuarzo	0 - 10 %
		Carbonatos y sericitas en patinas	< 5%
		Opacos	5 %
Microdiorita	Microgranular	Plagioclasas	40 %
		Biotitas	15 %
		Hornblendas (o cloritas)	40 - 50 %
		Ortosa	3 %
		Cuarzo	2 %
		Apatita, Allanita y Opacos	
Aplita	Inequigranular de grano grueso a fino	Cuarzo	50 - 60 %
		Feldespatos potásico	30 - 40 %
		Plagioclasas	20 - 30 %
		Sericita	2 - 5 %
		Clorita	0 - 5 %
Lamprófidio*	Xenomórfica inequigranular	Hornblenda	50 - 80 %
		Clorita	20 - 60 %
		Carbonatos	30 - 50 %
		Opacos (fenocristal acicular, prismático de ferromagnesiano)	1 - 5 %
Hornfels	Granoblásticas	Cuarzo	30 - 40 %
		Ortosa	30 - 40 %
		Plagioclasas	20 - 30 %
		Clorita	5 - 10 %
		Pirita	4 %

Fuente: (C. Ore, 2006)

3.3.2.2 Alteración

El criterio para dar el nombre a una alteración está dado por la abundancia del mineral de alteración dentro del conjunto, así: la **sericitización** es definida como alteración filica por: Bumham (1962), Lowell y Guilbert (1970), la **cloritización** definida como alteración propilítica por: Becker (1982), Von Richtofen (1868) y Zirkel (1873), la **argilización** que consiste en la formación de arcillas definidas por: Meyer y Memley (1967). Otros minerales de alteración serán clasificados como alteraciones subordinadas. Ver *Tabla 3-5*.

Así, la **sericitización**: Fílica (Cz-Sert) se observa en las vetas auríferas, diques aplíticos cuarzosos que afecta a las rocas ácidas, intermedias, básica hasta estructuras no mineralizadas tienen relación a esta alteración. Macroscópicamente en las rocas ácidas alteradas toman colores claros de tintes cremosos y en rocas intermedias a básicas son más claras que las rocas frescas (verde claro).

La **cloritización**: propilítica (Ch, Py, Cac), están relacionadas a estructuras verticales a subhorizontales. Con relación a la sericita, se presentan como franjas colindantes extremas a estas, de manera macro las rocas cloritizadas presentan colores verdosos.

En la **argilización**, las rocas afectadas presentan colores grisáceos blanquecinos a verdosos, generalmente esta se encuentra controlada por la presencia de planos de reactivación e interacción con aguas meteóricas, esta coloración es consecuencia de la removilización del SiO_2 así como los iones de Fe, K, Na y Mg.

En las **alteraciones subordinadas**, en la **Silificación** se encuentra relacionada a los bordes de diques aplíticos o al interior de estos mismos tomando colores de gris claro a gris verdosos.

Tabla 3-5: Características de las alteraciones

Orden	Alteración	Deutérico (relacionado a la formación del intrusivo)	Por Origen			Meteórico	Litología asociada		
			Hidrotermal						
			Minerales	Ubicación	Extensión (H)				
Principales	Sericitización	Como patinas sobre plagioclasas y feldespatos potásicos extendidas a nivel del intrusivo	Sericita +++	En bordura de vetas +++	Centímetros +	??	Granodiorita, Granito, Monzogranito, Aplita, Tonalita, Diorita, Lamprófiros, Metavolcánicos (toda la secuencia metamórfica)		
			Cuarzo + Carbonatos -	Fallas ++	Métricos -				
			Clorita -	(generalmente proximal)					
			Pirita --- Arcilla °						
	Cloritización	Actúan sobre las hornblendas (mejor en dioritas); también, ocurren en fracturas y fallas	Clorita +++	En bordura de vetas ++	Centímetros +	??	Lamprófiros, Diorita, Tonalita, Granodiorita, Granito, Monzogranito, Aplita, Metavolcánicos (toda la secuencia metamórfica)		
			Sericita -	al exterior de zonas (distal)	Métricos -				
			Cuarzo - Carbonatos -	Sericitizadas ++					
			Pirita -- Arcillas °	Fallas ++ Fracturas ++					
	Argilización	No es observado	Arcillas +++ Carbonatos +	Fallas +++ En bordura de vetas ---	Centímetros + Métricos -	Desarrollado en fallas mejor en planos de reactivación y en superficie	Granodiorita, Granito, Monzogranito, Tonalita, Diorita, Lamprófiros, Metavolcánicos (toda la secuencia metamórfica)		
Epidota -									
Subordinas	Silificación	En borduras de diques aplíticos	Cuarzo +++ Sericita +	En bordura de diques aplíticos ++ Fallas -- Fracturas -- En borduras de vetas ---	Centímetros + Métricos -	??	Aplita, Granodiorita, Granito, Monzogranito, Tonalita, Diorita, Lamprófiros, Metavolcánicos (toda la secuencia metamórfica)		
			Carbonatos ++ Sericita + Clorita +	En contactos zonales de sericita - clorita +++ En bordura de vetas + Fallas + Fracturas +	Centímetros + Métricos -			Desarrollada en fracturas y fallas; próximas a superficie	Lamprófiros, Diorita, Tonalita, Granodiorita, Granito, Monzogranito, Aplita, Metavolcánicos (toda la secuencia metamórfica)
	Epidotización	Ausente	Epidota +++ Carbonatos +	Fallas + Fracturas + En bordura de vetas °	Centímetros +	En superficie y planos de fallas y algunas fracturas superficiales	Granodiorita, Granito, Monzogranito, Tonalita, Diorita, Lamprófiros, Metavolcánicos (toda la secuencia metamórfica)		
	Hematización	??				Hematita ++ Clorita + Epidota ° Desarrollada en fallas y fracturas con anchos desde cm a m, alejadas de zonas mineralizadas	Monzogranito. Granodiorita, Granito, Tonalita, Diorita, Lamprófiros, Metavolcánicos (toda la secuencia metamórfica)		

Símbolos: +++ = muy abundante, ++ = abundante, + = común - = poco, -- = escaso, --- = muy escaso
° = presenta, pero indeterminado, ?? No se observa relación

Fuente: (C. Ore, 2006)

La **Carbonatación**, es una consecuencia de la alteración fílica y propilítica debido a la destrucción de plagioclasas y feldespatos potásicos (color marrón claro) además de ferromagnesianos (color marrón oscuro), entre los carbonatos reconocidos están la calcita y anquerita.

La **Epidotización**, se presenta en fallas reactivadas que contienen panizo, los cuales forman venillas. Su formación está asociada a agentes supérgenos y a los endógenos (fluidos hidrotermales)

3.3.2.3 Mineralización

(C. Ore, 2006), sostiene que en el interior de los cuerpos mineralizados, la distribución de las vetas obedece a los fenómenos estructurales, donde uno toma más importancia respecto a otros, de los cuales son de naturaleza de tracción (extensional), compresión o de desplazamiento. Es así como, la mineralización no es uniforme al paso de todas las estructuras de los controles estructurales reconocidos en el depósito, sean estos: curvaturas (inflexiones) en el rumbo o buzamiento, ramificaciones o bifurcaciones, contacto con fracturas laterales, uniones e **intersecciones de fallas**. De todas estas, la última **guarda relación de control de mineralización aurífera en el Batolito Pataz**. Estudios anteriores, muestra que la formación de vetas de cuarzo aurífero más importante en la región se encuentra en la bordura del Batolito de Pataz y que a su vez está emplazado y controlado por un fallamiento regional dando como una geometría lenticular y alargada.

La forma de mineralización pareciera estar controlada por diversos factores, desde el campo de los esfuerzos regionales, la reología⁷ de las unidades, la anisotropía⁸ de las

⁷ Ciencia que analiza el comportamiento de las rocas ante determinado tipo de presiones y su respuesta a la elasticidad, rigidez y plasticidad.

⁸ Característica de los minerales de variar sus propiedades físicas (ópticas) al cambiar la dirección.

fracturas, la existencia de fallas y diques, naturaleza de contactos litológicos y planos de pseudoestratificación en el caso de rocas metamórficas.

Por lo que, la mineralización presenta diferente geometría, donde los filones pueden estar regulados por rocas homogéneas y competentes como la diorita, a irregulares como en el caso de las rocas meta-sedimentarias que tienen un comportamiento anisótropo. De esto, se obtiene potencias de vetas que varían desde centímetros hasta los 12 metros (Veta Consuelo), con promedios de leyes desde inferiores a 1 g Au/ton a mayores a 90 g Au/ton. Los sectores potenciales de mineralización son:

- En zonas de cizalla de orientación N – S
- En vetas de extensión
- En vetas concordantes con la estratificación
- En Fallas regionales E – W

Los Ore Shoots o clavos mineralizados trabajados y reconocidos están asociados a la intersección de las fracturas de orientación NNW – SSE con las fallas secantes o transversales a las vetas de movimiento sinextral (desplazamiento a la izquierda) aparente. Estas fallas secantes (transversales) son afectadas por fuertes alteraciones hidrotermales, por lo que se observa que hubo una circulación de fluidos a través de ellas en el proceso de formación de las vetas y clavos mineralizados.

3.3.3 Yacimiento de Mineral

Debido a la antigüedad de la formación del batolito de Pataz, el yacimiento de Poderosa es considerada como uno de tipo orogénico. (Y. Haeberlin et al, 2004) considera a los yacimientos del Norte de Pataz en sus profundidades como modelo “orogénico” puesto que se basa en la relativa diferencia de edades de formación del intrusivo de 329 ± 1 Ma (método U/Pb para biotita) y la mineralización de 314 -312 Ma (método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para muscovita). Asimismo, (Tomkins, 2013) sostiene que este tipo de yacimiento se forma debido a la predominancia de la roca metamórfica en la corteza medio o superficial, la cual oscila entre 5 y 15 Km de profundidad, en la que la roca está en una transición de frágil – dúctil y a su vez de un contexto estructural compresional, los que facilita la transferencia de fluidos portadores de oro caliente desde niveles más profundos. Además, sustenta que la transferencia de fluidos débilmente oxidados y de baja salinidad a los sitios de deposición de oro está controlado por los eventos de tectónica, terremotos, lo cual permite que los fluidos atraviesen rápidamente grandes espesores de la corteza. Este cambio inminente hace que tome los fluidos fuera de equilibrio con su entorno, lo cual genera una desestabilización de los complejos de hidrosulfuros de oro portadores **[Au(HS) $_2$ $^-$ y AuHS]**. Por otro lado, la precipitación de oro es facilitada por la disminución de la presión y temperatura, y además de la reacción con la roca fluida (K. Evans et al, 2006), mezclas con otros fluidos y quimiosorción, el cual es un tipo de adsorción que implica una reacción entre la superficie y un compuesto soluble, estas superficies son de pirita y arsenopirita (Moller & Kersten, 1994).

Además, (Tomkins, 2013) sostiene que hay dos fuentes para la deposición del metal dorado, el primero es de roca metamórfica, donde se generan fluidos a medida que aumenta la temperatura; y el segundo, de flujos magmáticos, los cuales liberan fluidos a medida que cristaliza. Estos depósitos magmáticos hidrotermales portadores de oro se

beneficia de otros elementos como S, Cu, Mo, Sb, Bi, W, Pb, Zn, Te, Hg, As y Ag. No obstante, los **depósitos de tipo orogénico se caracterizan por su elevada presencia de S y As.**

En el área de geología, el jefe de prospección y exploración regional, realizó una explicación sobre el yacimiento de Poderosa de la siguiente manera:

“(…) que debido a una presión de disparo o “Triggering” los fluidos magmáticos ascienden, a nivel regional, esta fuente contiene óxido de hierro, trióxido de hierro, agua, óxido de sodio, metano, dióxido de carbono y agentes ligantes como el $[HS^-]$ y $[H_2Cl^-]$, los cuales al ir ascendiendo estos agentes ligantes disuelven a los metales, o podríamos llamarlo como lixiviación de metales, dándose productos como $[AuCl_2^-]$ o $[Au(HS)_2^-]$. El transporte de estas soluciones lixiviadas fue debido a los acontecimientos tectónicos por lo que ascendieron a una zona llamada trampa estructural o química, donde en principio esta zona es rocosa, permeable debido a las fracturas y fallas. Es aquí, es donde se realizará de deposición del oro y dependiendo sobre todo de la reacción de la solución lixiviada con la roca, la cual dependerá de su reactividad. Es decir, pasar de un compuesto químico complejo a un estado sólido. Esto es posible a la disminución de presión y temperatura, cambio de pH, variación de concentraciones, variación el potencial de óxido reducción o redox (…)”

En el Figura N° 3- se realizó la esquematización a modo conceptual de la formación del yacimiento de la compañía entre el jefe de prospección y del investigador.

Figura N° 3-13: Diagrama conceptual – formación del yacimiento

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Mineralogía

Las características de un depósito mineral y su ensamble determinan el método de extracción de este, donde el mineral establecerá sus requisitos y rendimiento de extracción en el proceso que involucre el beneficio del oro. Por tanto, es necesario comprender la mineralogía del mineral para tener una eficacia y eficiencia del proceso metalúrgico. El oro es un metal noble y, además el más inerte; por lo que no hay muchos compuestos de oro en la naturaleza, No obstante, está asociado a algunos minerales, los que se presenta en el *Tabla 3-6: Minerales asociados al oro*. La ocurrencia predominante es cuando el metal nativo está aleado con la plata, otro metal noble. No obstante, cuando el contenido de plata supera el 20%, la aleación se llama electrum, término no oficial pero universalmente aceptado. Las características del oro que los separan de los otros minerales incluyen su alta gravedad específica, brillo (alta reflectancia) y dureza, este último medido en la escala de Vickers. Además, el oro se presenta de diversas formas (*Figura N° 3-*), como por ejemplo las submicroscópicas que no pueden ignorarse cuando se consideran las opciones de procesamiento y la optimización de su recuperación. Estas ocurrencias del oro se consideran como solución sólida, oro coloidal (Chrysoulis & McMullen, 2016).

En la tabla periódica se tiene a la familia de metales nobles, los cuales están conformados por el cobre, plata, oro y otros. Al ser de la misma familia, tienen características similares como formar aleaciones. (Allan & Woodvock, 2001) realiza un diagrama ternario *Figura N° 3-14: Diagrama ternario de Au-Ag-Cu*, donde sólo participan los tres elementos. Se observa que no hay una composición específica para oro nativo o electrum sino más bien un rango entre estos. Asimismo, sostiene que el término de “oro libre” se usa comúnmente y de manera incorrecta para describir cualquier partícula de oro visible. Pues, en la práctica se observa que está unido a otro

material como por ejemplo el cuarzo, por lo que el oro sería una partícula compuesta. No obstante, autores usan el término de oro libre como sinónimo de oro soluble en cianuro. También, consideran que las partículas visibles de oro en pirita y otros minerales están "bloqueados" a pesar de que tal oro puede liberarse fácilmente mediante la molienda. Dichas partículas se consideran mejor como partículas compuestas.

Figura N° 3-14: Diagrama ternario de Au-Ag-Cu

Fuente: (Allan & Woodvock, 2001)

(A. Betejtin, 1970) describe la formación de los minerales en la naturaleza a) mediante la cristalización de líquidos, lo cual depende de la temperatura y presión y está muy ligado a la sobresaturación; b) por medio de la precipitación de los cristales en las paredes de las cavidades a partir de los productos gaseosos de la sublimación; y c) recristalización de las masas sólidas (en partículas coloidales).

Es decir, la presión y temperatura tiene una gran influencia en la sobresaturación siendo esta forzada o espontánea, entendiéndose saturación como una solución en equilibrio donde se llega a un límite en donde un soluto puede disolverse en un solvente a una determinada temperatura y presión. Sin embargo, ante una disminución de temperatura, la solución ya no estaría en equilibrio por lo que se daría paso a una precipitación o cristalización, dependiendo el proceso de formación, pues habría un exceso de soluto, lo cual llamamos sobresaturación.

Uno de los procesos de cristalización comienza con una sobresaturación débil en la disolución dando como producto cristales grandes. Mientras que, sí existe una sobresaturación fuerte se formará microcristales. Sin embargo, en disoluciones muy intensamente sobresaturadas se obtiene formaciones de criptocristalinas o coloidales.

Figura N° 3-15.

Teniendo en cuenta los trabajos de (Miranda_C, 1983), (Schreiber_et.al, 1990), (Y. Haeberlin et al, 2004) en la paragénesis del Batolito de Pataz (Ver *Figura N° 3-16*), nos muestra que en una primera etapa se tuvo cuarzo lechoso acompañado con **pirita** y **arsenopirita** (en el estadio I), luego por la reactivación tectónica de las vetas se produce el fracturamiento de los minerales depositados en dicha etapa. En una segunda generación (estadio II) ocurre el ascenso de cuarzo gris de grano fino, más **esfalerita** con exsoluciones⁹ de calcopirita y pirrotita, posteriormente **galena** con inclusiones¹⁰ de **sulfosales de antimonio**, el **electrum** está hospedado principalmente en la esfalerita, el **oro nativo** precipita más tarde generalmente con galena y también en la pirita fracturada, hacia el final de esta etapa tiene lugar un procesos de recristalización a pequeña escala y nueva deposición de pirita y arsenopirita (C. Ore, 2006).

De los minerales asociado al oro se observa que hay una gran afinidad con los sulfuros y arseniuros, por lo que es necesario describir su comportamiento y características en base al libro de (The Chemistry of Gold Extracción, 2006).

⁹ Minerales que se forman a partir de otros por enfriamiento y que generalmente se hallan incluidos (inclusiones en éstos, por ejemplo, las exsoluciones de calcopirita en esfalerita)

¹⁰ Aparición de un cuerpo o sustancia extraña que puede ser sólida, líquida o gaseosa, dentro de un mineral o roca

Tabla 3-6: Minerales asociados al oro

	Elemental	Sulfuros	Arseniuros	Antimoniuros	Seleniuros	Teleluros
Hierro		FeS Pirrotita FeS₂ Pirita Marcasita	FeAsS Arsenopirita			
Cobalto			CoAsS Cobaltita			
Níquel		(Fe,Ni)₉S₈ Pentlandita				
Oro	Au Oro nativo Au, Ag Electrum			AuSb₂ Auroestibita		AuTe₂ Calaverita
Plata	Ag Plata nativa Ag, Au Electrum	Ag₂S Argentita (Pb,Ag)S Galena Argentífera	Ag₃AsS₂ Prousitita (Cu,Fe,Ag)As₄S₁₃ Tenantita Argentífera	Ag₃SbS₃ Pirargirita (Cu,Fe,Ag)Sb₄S₁₃ Tetrahedrita argentífera	Ag₂Se Naumanita	Ag₂Te Hessita
Mercurio		HgS Cinabrio				
Cobre	Cu Cobre nativo	Cu₂S Calcocita CuS Covelita Cu₅FeS₄ Bornita CuFeS₂ Calcopirita	Cu₂AsS₄ Enargita (Cu,Fe)As₄S₁₃ Tenantita	(Cu,Fe)Sb₄S₁₃ Tetrahedrita		
Plomo		PbS Galena				
Cinc		ZnS Esfalerita				
Carbón	C Grafito/Carbón amorfo					
Arsénico		AsS Regalgar As₂S₃ Oropimente				
Antimonio		Sb₂S₃ Estibina				
Bismuto	Bi Bismuto nativo	BiS₃ Bismutinita				Bi₂Te₂S Tetradimita

Fuente: (Marsden & House, 2006)

Figura N° 3-15: Tipos de asociaciones del oro con sulfuros

Fuente: (Marsden & House, 2006)

Figura N° 3-16: Paragénesis del distrito del norte de Pataz

Fuente: (Y. Haeberlin et al, 2004)

En nuestra zona de estudio tenemos los siguientes minerales asociados al oro:

Pirita (FeS₂)

Es el mineral de sulfuro comúnmente asociado al oro. Asimismo, es común en las vetas de minerales y minerales metamórficos. Tiene una gravedad específica de 4,800 a 5,000 kg/m³, y es relativamente duro. Además, la pirita es un mineral muy estable en soluciones acuosas, y su potencial estándar de reducción es alto dando como resultado una baja reactividad en las condiciones ligeramente oxidantes típicas de la lixiviación de cianuro. Las inclusiones de oro fino en pirita requieren condiciones de molienda más extremas y/o fuertemente oxidantes para liberar el oro. Esta falta de reactividad es una ventaja, ya que los consumos de reactivos no aumentan con la reacción con pirita. En consecuencia, la pirita generalmente es solo un problema en el proceso de conminución, ya que afecta la liberación de oro; rara vez es cianicida (consumidor de cianuro).

Asimismo, el oro puede aparecer en muchas asociaciones texturales con pirita y arsenopirita, como se muestra en el *Figura N° 3-15*. Para la asociación de sulfuro de oro de los tipos “a”, “b” y “c” de dicho Figura, el oro puede ser fácilmente liberado. Sin embargo, para los tipos “e”, “f” y posiblemente “d”, el oro puede permanecer sin liberar incluso en tamaños finos.

Marcasita (FeS_2)

La marcasita tiene la misma composición que la pirita, pero tiene un sistema de cristal ortorrómbico en vez de cúbico. Se forma a temperaturas más bajas que la pirita y generalmente se presenta en rocas secundarias. Aunque la marcasita es menos común que la pirita, frecuentemente se encuentra entrelazada con pirita en minerales de sulfuro y puede constituir hasta 30% del total de sulfuros de hierro en un mineral de oro pirítico típico. En ciertos casos, la marcasita es un importante mineral de sulfuro, puede ser un importante **consumidor de cianuro y oxígeno** en la cianuración.

Pirrotita (Fe_{1-x}S)

La pirrotita es el nombre para los sulfuros de hierro dado la fórmula Fe_{1-x}S , donde x puede variar entre 0 y 0.2. Hay dos tipos de pirrotita, hexagonal (Fe_9S_{10}) y una monoclinica (Fe_7S_8). La pirrotita es estable en condiciones más reductoras que la pirita y, por lo tanto, tiende a oxidarse más fácilmente. La pirrotita monoclinica tiene una susceptibilidad magnética relativamente alta y puede recuperarse por medio de un equipo de separación magnética industrial. El principal impacto en la recuperación de oro es que **la pirrotita consume cianuro y oxígeno** en la cianuración.

Los minerales asociados a una matriz de arsénico son:

Arsenopirita FeAsS

La arsenopirita es un huésped común para el oro, en segundo lugar, solo para la pirita. Se han encontrado leyes de oro de hasta 15,200 g/t en una muestra de arsenopirita en Villerange en Francia. Las asociaciones de oro son similares a las de los ensambles de pirita y oro (*Figura N° 3-15*). La arsenopirita es marginalmente menos dura, aunque es más frágil que la pirita, lo que da como resultado una molienda preferencial y un tamaño de producto más fino que la pirita. En los minerales arsenicales formados a alta temperatura, el oro puede incorporarse en la red de arsenopirita, ya sea en solución sólida o en las caras de cristal en crecimiento. Al enfriarse, el contenido de oro distorsiona la estructura. La concentración de oro en solución sólida puede ser mucho mayor en arsenopirita que en pirita, debido a su espaciado atómico mejor adaptado.

Oropimente (As_2S_3)

El oropimente tiende a formarse en condiciones de oxidación (por ejemplo, en la zona oxidada de las vetas minerales asociadas a los intrusivos). Asimismo, es soluble en soluciones alcalinas. Esto puede interferir significativamente con la cianuración mediante el consumo de cianuro y la introducción de especies perjudiciales de arsénico en la solución.

3.3.5 Procesamiento del oro

El beneficio o procesamiento del mineral en la Planta Maran utiliza el mtodo de cianuracin directa. Entendindose como la disolucin del oro en cianuro bajo condiciones normales, es decir a una presin de 1 atm y 25C de temperatura. En principio, el oro debe estar en forma libre y limpio para que el cianuro pueda actuar sobre l. En la organizacin se trabaja con cianuro de sodio, a partir de ello se obtiene el ion cianuro (CN⁻) que reaccionar con el oro libre. En 1846, el alemn Elsner propuso la reaccin de disolucin de oro (Marsden & House, 2006).

(Harris, 1990) sostiene que, la mayora de los minerales aurferos, cuya recuperacin metalrgica est en el rango del 90% puede lograrse por medio de tcnicas convencionales como la gravedad, flotacin y cianuracin directa. Para los minerales de tipo refractario, los cuales no son tan efectivos en cianuracin directa, requiere otros tratamientos adicionales. El procesamiento de cualquier mineral de oro requiere datos mineralgicos. Por lo que, se determina factores mineralgicos que pueden afectar el proceso y estos son:

Tabla 3-7: Factores que afectan a la recuperacin metalrgica

Factores mineralógicos que afectan la recuperación metalúrgica	1 – Naturaleza del mineral que contienen oro
	2 – Tamaño de grano del mineral aurífero
	3 – Naturaleza de los minerales de la ganga
	4 – Minerales de sulfuro asociados
	6 – Recubrimientos sobre el mineral aurífero
	7 – Enlaces químicos del oro u oro “invisible”

Fuente: (Harris, 1990)

Para la mayora de los procesos metalrgicos es necesario recurrir a la divisin de las partculas mediante operaciones de chancado o molienda. En 1937, Haycock examin el tamao de partculas de oro de cincuenta minerales canadienses mediante una tcnica

microscópica y descubrió que el mayor porcentaje en cualquier tamaño de grano de oro individual caía bien dentro del rango microscópico. Asimismo, realizó pruebas de molienda indicando que se pueden trazar límites, algo indefinidos, entre las áreas que representan amalgamación efectiva, cianuración efectiva y cianuración ineficaz o minerales de tipo refractario. Es así, que los estudios de Haycock se centraron en minerales de alta ley de oro, obteniendo datos que se muestra en el *Figura N° 3-17*, donde se observa claramente las proporciones relativas de oro en minerales de molienda comunes con respecto al tamaño de su granulometría, oro coloidal y oro en solución sólida.

Fuente: (Harris, 1990)

Continuando con el procesamiento del mineral aurífero, una vez obtenida la solución aurocianuro, éste pasa al proceso de precipitación mediante la adición de polvo de cinc, llamado Merrill Crowe. En donde, un requisito primordial es que la solución cianurada

esté totalmente libre de cualquier partícula en suspensión, es decir, debe estar clarificada y después de esto debe ser extraído todo el aire posible para que recién se agregue el cinc y así se obtenga el precipitado de oro.

En la práctica, en la precipitación se requiere cumplir: 1) que las suspensiones hayan sido eliminadas, como lamas o carbonatos; 2) que no ocurra una precipitación posterior a la clarificación, ya que generaría nuevas suspensiones; 3) que los carbonatos y sulfatos, formadores de sarro hayan sido eliminados; 4) la eliminación de oxígeno y de bicarbonatos disueltos en la solución. (Vargas Gallardo, 1990).

La precipitación con polvo de cinc ocurre de la siguiente manera:

(Marsden & House, 2006) sostiene que la reacción debe estar exento de oxígeno, ya que de haberlo se formaría hidróxido de cinc y la solución de aurocianuro no podría pasar a oro metálico. Asimismo, cabe resaltar que la **reacción** anterior es un **ideal**, es decir sí sólo existe solución de aurocianuro y polvo de cinc. En la práctica, sin embargo, existen otros compuestos cianurados que pueden competir con la solución de oro para la formación de precipitado.

El siguiente proceso, fundición, el precipitado seco es mezclado con fundentes y es llevado a fusión directa y luego con tratamiento ácido hasta obtener el oro bullion comerciable, es decir que no supere los límites de penalidades.

En el capítulo 10 de (The Chemistry of Gold Extracción, 2006) El proceso de fundición es utilizado con el fin de mejorar los productos recuperados de los procesos anteriores, principalmente de la precipitación con polvo de cinc, que por lo general contiene más de 10% de oro. Asimismo, los métodos aplicados dependen de la naturaleza del material,

tipo y cantidad de impurezas presentes. Mientras que, en la refinación se realiza generalmente en dos etapas:

- Tratamiento en el punto de producción (por ejemplo, en el sitio de la mina) para producir un **lingote de oro bullion** (generalmente entre 90% y 99% de metales preciosos totales)
- Refinación de lingotes en bruto de la primera etapa para producir oro y plata de alta pureza en venta.

Para nuestro caso, en Minera Poderosa, sólo llegamos hasta la obtención de oro Bullón.

Por lo que, podemos decir, en conclusión, que todo el tratamiento del mineral aurífero desde su obtención hasta su producción, en oro bullion, depende del tipo mineral.

Es así como, en nuestra investigación cada mineral proveniente de cada zona tendrá diferentes impurezas, lo cual afectará a nuestro producto final, lo que al fin y al cabo representa nuestra rentabilidad.

3.3.6 Muestreo y representatividad

Al mencionar muestreo nos referimos al conjunto de técnicas que estudian la forma de seleccionar una muestra, la cual deberá ser la más representativa de una población. Puesto que, la información obtenida permitirá inferir las características o tendencias de la población con cierto grado de confiabilidad (Pérez, 2005).

Asimismo, para tener un mayor entendimiento debemos definir los términos que involucra un muestreo:

Muestreo: *“Acción de escoger muestras representativas de la calidad o condiciones medias de un todo”* (RAE, 2017).

Población *“Conjunto de los elementos sometidos a una evaluación estadística mediante muestreo”* (RAE, 2017).

Muestra: *“Parte o porción extraída de un conjunto por métodos que permiten considerarla como representativa de él”* (RAE, 2017).

Entonces, se puede decir que el muestreo es el medio para estimar una población a partir de una muestra representativa. No obstante, al inicio se mencionó que el muestreo es un conjunto de técnicas, la cual tiene como finalidad seleccionar muestras. Sin embargo, cada técnica de muestreo debe ser acorde al objeto específico. (S. Lohr, 2000). Sin embargo, (M. Alfaro, 2002) sostiene que hay una diferencia entre muestreo estadístico y muestreo de mineral, ya que el primero considera a la población como objetos de igual peso, mientras que el segundo considera que los pesos son diferentes. Es decir, en nuestro caso, el mineral aurífero que contiene oro proviene de diferentes zonas geológicas, las cuales le dará un tamaño granulométrico variable. Además, el mismo autor, sustenta que la definición inicial debe cumplir que el muestreo debe ser equiprobable, lo cual quiere decir que en un muestreo de un lote o población (**M_L**) compuesto de (**N**) fragmentos, será equiprobable cuando todas las combinaciones de **n**

fragmentos tienen la misma probabilidad de ser elegidos para ser considerado una muestra representativa. En caso contrario, según **Pierre Gy**, creador de la teoría moderna de muestreo de minerales, se tendría un **espécimen** en vez de una **muestra**.

La importancia del muestreo se refleja en la toma de decisiones que van desde la exploración hasta el cierre de mina. Asimismo, establece que todo muestreo mineral deberá tener lo siguiente: 1) Objetivo del muestreo; 2) Población por muestrear; 3) Datos por recolectar; 4) Manera de recolectar los datos; 5) Grado de precisión deseado; 6) Método de medida (M. Alfaro, 2002).

Teniéndose en cuenta el objetivo específico y su importancia, es necesario diferenciar los principales tipos de muestreo. (S. Lohr, 2000) sustenta los tipos de muestras de probabilidad simples, donde están los términos de muestra aleatoria simple, estratificada y conglomeradas. En la que, la primera muestra tiene la misma probabilidad de ser elegida de toda la población; en la segunda, la población es dividida en estratos, de forma cualitativa o cuantitativa, y de cada subconjunto de ellos se extrae una muestra aleatoria simple, logrando que aumente la precisión; y, por último, en una muestra de conglomerado las unidades de observación que componen una población se reúnen en unidades de muestreo de mayor tamaño y luego se elige una muestra aleatoria simple. Asimismo, (M. Alfaro, 2002), agrega el muestreo sistemático, el cual las extracciones son determinadas según una regla fija, por ejemplo, cada cierto tiempo o a cada cierto metro escoger la muestra representativa. Además, es necesario, definir la exactitud y precisión, ya que los conceptos de media, sesgo y varianza están en ellas. Donde, la media es el valor medio o “valor esperado”; el sesgo está asociado a la exactitud, lo cual quiere decir que tan cerca está del valor medio, es decir sí la diferencia es muy grande se dirá que está sesgado, caso contrario sí es pequeña será insesgado; y, por último, la varianza me representa la dispersión o error del muestreo (S. Lohr, 2000).

Del siguiente Figura, (M. Alfaro, 2002) sostiene que en el muestreo de minerales no se debe tener sesgo y que los resultados sean reproducibles. Es decir, que una **muestra será representativa si es equiprobable y de varianza pequeña**. Del *Figura N° 0-4* se presenta a modo de ejemplo 4 medias de diferentes lotes o poblaciones donde: a) esta sesgado y tiene varianza grande; b) insesgado y varianza pequeña; c) insesgado y varianza grande; d) sesgado y varianza pequeña.

Figura N° 0-4: Exactitud y precisión

Fuente: (M. Alfaro, 2002)

Una causa fundamental de los errores de muestreo es la heterogeneidad de los minerales muestreados (Gy 1979, Pitard 1993). Es decir, cuanto más heterogéneo es el material, más difícil es obtener una muestra representativa e inferir las características a partir de dichas muestras (Abzalov, 2016).

En el libro de (Introducción al Muestreo Minero, 2002) menciona los tres (03) estados del mineral, en donde los clasifica en cómo se puede encontrar el mineral:

- a) In Situ, el cual corresponde a la aplicación de la teoría de la Geoestadística
- b) Quebrado, corresponde a la aplicación de la teoría de muestreo de Pierre Gy
- c) Liberado, se hace referencia al proceso de conminución (molienda), donde se ha separado el material estéril del componente de valor comercial.

Razón por la cual, en cada etapa del negocio minero, sea exploración, geología - mina y beneficio de mineral se tendrá distintas formas de muestreo. Es decir, habrá distintos protocolos de muestreo según cada etapa del negocio minero.

Por ejemplo, en interior mina se realizará el muestreo dependiendo del canal de muestreo. Tal como lo sugiere el siguiente Figura.

Figura N° 3-5: Muestreo en interior mina

Fuente: (Abzalov, 2016)

Cuando se tiene el mineral fragmentado, éste es chancado y enviado a las fajas transportadoras, en donde se realiza el muestreo en el extremo del transportador, lo cual hace que sea un buen método de muestreo, puesto que el material presentará dos formas de segregación. Es decir, sí es que el mineral que se carga a la faja transportadora desde un alimentador o salida de tolva situándose en el centro de la faja, los finos tenderán a concentrarse en el centro de la correa y las partículas gruesas se ubicarán en los bordes exteriores.

Cada incremento muestral o toma de muestra, debe obtenerse recolectando toda la secuencia por un corto tiempo. Es decir, el muestreador, automático o no, debe pasar por todo el ancho del extremo de la faja. Por lo que, se debe tener cuidado al colocar y sacar la muestra de la corriente (Particle Size Measurement, 1990).

El siguiente Figura se muestra el método correcto para realizar el muestreo.

Figura N° 3-6: Muestreo en un extremo de faja transportadora

Fuente: (Allen, 1990)

El ancho del receptor, “b”, se elegirá para obtener el peso aceptable de la muestra, pero no debe ser tan pequeño, ya que las partículas más grandes tendrán dificultad para ingresar al receptor. Es probable que las partículas que golpean los bordes del receptor reboten y no se recojan en el ancho efectivo “ $b - d$ ”, donde “d” es el diámetro de las partículas. Por lo tanto, el ancho efectivo es mayor para partículas pequeñas que para partículas grandes (Allen, 1990).

(Holmes, 2016) sostiene que la mejor manera de tomar muestras en movimiento es por medio de un cortador correctamente diseñado en el punto de descarga de la faja transportadora. El flujo de mineral se puede intersectar con el muestreador en momentos de tiempo preseleccionados, en los que se pueden recoger muestras representativas, o incrementos, tomándose la sección transversal completa del flujo de mineral, eliminando así la delimitación de incremento y los errores de extracción.

Asimismo, el mismo autor mantiene que, al tomar muestras de flujos en movimiento, la corriente se divide en estratos de igual tiempo o masa, y luego se toman incrementos

muestrales de un punto fijo de tiempo o masa en cada estrato (**muestreo sistemático**) o al azar dentro de cada estrato (**muestreo aleatorio estratificado**). Sin embargo, sí existe variaciones en la calidad de la muestra en el flujo, el muestreo aleatorio estratificado se debe utilizar para eliminar el posible sesgo. Además, para el **muestreo en masa**, las masas de incremento muestral deben ser casi uniformes para garantizar que cada incremento contenga la información de ponderación correcta. Para el **muestreo basado en el tiempo**, la masa de incremento debe ser proporcional al caudal del flujo, por lo que se requiere un cortador de velocidad fija. En la práctica, el muestreo basado en el tiempo es más fácil de implementar, pero las variaciones en el índice de flujo no deben ser excesivas, de lo contrario, la masa del incremento puede no ser proporcional al caudal promedio durante el intervalo de muestreo.

Los cortadores de muestras que se usan para estos flujos en movimiento deben cumplir las siguientes reglas de diseño para eliminar la delimitación de incrementos y los errores de extracción: (Holmes, 2016)

- *El cortador debe recoger una sección transversal completa de la corriente.*
- *El cortador de muestras debe ser no restrictivo y deberá descargar completamente cada incremento sin reflujos o desbordamiento.*
- *La geometría de la abertura del cortador debe garantizar que el tiempo de corte en cada punto del flujo sea igual.*
- *El cortador debe interceptar el flujo en un Figura Normal a la trayectoria media del flujo.*
- *El plano de los bordes del cortador no debe estar vertical o cerca de la vertical, porque las partículas que golpean el borde interno de los costados del cortador, los cuales deberían estar en la muestra, se desvían por gravedad hacia la corriente de rechazo.*

- *El cortador debe viajar a través del flujo a una velocidad uniforme, acelerando hasta su velocidad de corte antes de entrar en el flujo de mineral y luego decelerar hasta detenerse después de salir del flujo.*
- *La abertura del cortador debe ser al menos tres veces superior al tamaño nominal (d) del mineral o concentrado que se muestrea para evitar la pérdida de las partículas más grandes.*

La velocidad del cortador es importante para cortadores transversales y Gy y Marin (1978), demostraron que puede oscilar desde los 0.6 m/s hasta 1,2 m/s. Sin embargo, la abertura efectiva del cortador disminuye a medida que aumenta la velocidad del cortador, y esto puede excluir preferentemente las partículas más gruesas y de ese modo introducir un sesgo. La masa incremental m_i (kg) tomada por un cortador transversal está determinada por la abertura del cortador A (m), la velocidad del cortador V_c (m/s) y el flujo de mineral G (t/h) de la siguiente manera:

$$m_i = \frac{G \times A}{3.6 \times V_c}$$

En consecuencia, para un caudal o flujo dado, la masa mínima de incremento que puede tomarse correctamente para evitar el sesgo está determinada por la abertura mínima del cortador y la velocidad máxima del cortador. **No es posible tomar incrementos insesgados de masa más pequeña a menos que se reduzca el caudal o se triture el mineral antes del muestreo, de modo que la apertura del cortador se pueda reducir en consecuencia.**

Un parámetro muy útil para verificar el diseño y el funcionamiento de las cortadoras de muestras es la relación de extracción, que es la relación entre la masa de incremento real recogida y la masa de incremento teórica calculada mediante el uso de la ecuación previamente descrita. Si esta relación es significativamente menor que 1, entonces es necesario identificar la causa y tomar medidas correctivas para rectificar el problema.

3.4 Marco tecnológico

3.4.1 Planta de beneficio o de procesamiento

En Compañía Minera Poderosa S.A. cuenta con 2 plantas de beneficio de minerales, siendo “Marañón” y “Santa María I”.

La primera desde sus inicios (1982) hasta el año 2016 ha ampliado sus operaciones en 8 veces hasta llegar a los 1,300 TMD (mil trescientas toneladas métricas día) en conjunto.

En un artículo de la revista “El Batolito” N° 44 titulado “Historia de crecimiento” presentan un cuadro informativo por parte de la superintendencia de planta, las ampliaciones realizadas en la compañía.

Tabla 3-8: Ampliaciones de la planta de beneficio

# Ampliaciones	Año	UP Marañón TMD	UP Santa María TMD	Total, PODEROSA TMD
1	1982	120	0	120
2	1986	250	0	250
3	1993	350	0	350
4	1994	550	0	550
5	1997	550	200	750
6	2010	700	280	980
7	2013	700	400	1,100
8	2016	700	600	1,300

Fuente: (CIA_PODEROSA, 2016)

El presente trabajo de investigación se realizará en la planta de Beneficio de Marañón, debido a que, a partir del 2017, dicha planta tratará los minerales de acopio procedentes del cateo libre en su totalidad.

3.4.1.1 Planta de Beneficio Marañón

La planta está ubicada en el caserío de Vijus, próximo al Río Marañón a una altitud de 1,250 m.s.n.m.

La operación de la Planta es la siguiente

Trituración o Chancado

Los minerales provenientes de Acopio, Cateo libre, y Mina son almacenados en las tolvas de gruesos por separado, en donde es triturado por una chancadora primaria de quijada hasta una granulometría de $-2''$ y seguidamente por una chancadora cónica hasta una granulometría de **96% $-3/8''$** . Dependiendo la ley de cabeza del mineral procedente, es almacenado en Tolvas de finos, donde el Tolva N° 01 es de 1,200 TM y el Tolva N° 02 de 100 TM.

Figura N° 3-7: Operación de chancado primario y secundario

Fuente: Elaboración propia

Molienda y Concentración Gravimétrica

Del Tolva de finos, la descarga, es el alimento para la molienda primaria, donde se agrega solución de lechada de cal y cianuro de sodio con el fin de iniciar la lixiviación de oro. El producto de esta molienda es llevado a un primer ciclón plano, obteniendo un material grueso y uno fino, este material grueso pasa por una zaranda, el cual lo separa nuevamente en grueso y fino, y este grueso regresa a la molienda primaria, mientras el fino de la zaranda y el fino del primer ciclón son enviados a otro ciclón donde el producto fino es enviado a la separación sólido líquido y el producto grueso pasa a concentración gravimétrica.

Esta concentración gravimétrica se realiza con espirales en dos etapas, la primera de un banco de 3 espirales y la segunda de otro banco de 7 espirales. A partir, de cada

banco se obtiene tres productos: concentrado, medios y relave. El relave del primer banco es el alimento del segundo banco de 7 espirales. Asimismo, el producto medio del primer y segundo banco ingresa al circuito inverso de remolienda de medios. Los concentrados del primer y segundo banco, en su mayoría compuesto de sulfuros, ingresan a otro circuito inverso para su respectiva remolienda. Ambas etapas de remolienda trabajan en circuito cerrado con un ciclón cada uno, donde el fino es enviado a la separación sólido/líquido, mientras que el grueso regresa al circuito de remolienda respectiva.

En este proceso se logra lixiviar un aproximado de 73%, es decir que hay presencia del complejo oro – cianuro en la solución, el cual está a un pH de 11 en promedio. La granulometría de la molienda primaria es en promedio de 48% - 200M y de las remoliendas de concentrado y medios están en promedio de 98% - 200M y 90% -400M en ambos casos. Lográndose un producto en general promedio de 57% - 200M.

Sedimentación y Agitación

Los productos obtenidos de la molienda y concentración gravimétrica se mezclan en un cajón, el cual alimenta a un espesador de separación sólido – líquido, donde se obtiene dos productos: solución rica y pulpa de alta densidad. La solución rica es enviada al proceso siguiente de precipitación, mientras que la pulpa de alta densidad es diluida con solución barren, que proviene del área de precipitación, con el fin de bajar la densidad e ingresar al circuito de lixiviación por agitación en cuatro tanques agitadores en serie por 24 horas. La pulpa del último agitador pasa un circuito de lavado a contracorriente de cuatro espesadores en serie, lavándose dicha pulpa con agua recuperada de la cancha de relaves o de planta de filtrado de relaves, más solución barren proveniente de precipitación. La solución producto, de todo el lavado es el llamado solución molino, el cual es enviado al circuito de molienda primaria y la pulpa

espesa es enviada a la cancha de relave o planta de filtrado con una densidad promedio de 1590 g/L. La ley del sólido de la pulpa que va al relave tiene valores menores a 1.8 g Au/TM y de la solución un valor menor a 0.2 g Au/m³.

Precipitación

La solución rica obtenida en la etapa de separación sólido – líquido es bombeado a unos filtros clarificadores para retirar los sólidos en suspensión y luego de esto, pasa por una torre de vacío para extraer el oxígeno disuelto. A esta solución libre de partículas y de oxígeno disuelto, se agrega un pre-capador y polvo de cinc para que se precipite un cemento de oro y plata. Dicha solución que contiene el cemento de oro pasa por un filtro prensa para separar el precipitado y la solución filtrada, llamada solución barren, es enviada al circuito de lavado en contra corriente o a la lixiviación por agitación.

La recuperación en precipitado es de orden de 98%, con leyes de oro y plata en el precipitado de 21.3% y 18.3% respectivamente. La solución barren contiene en promedio 0.08 g Au/m³.

Disposición de Relaves

La disposición de relaves en pulpa se realiza en una cancha de relave, que a su vez sirve de posa de secado. Aquí, el producto de relave seco, relativamente, es enviado por camiones a la relavera llamada Livias para su disposición y compactación final. El agua recuperada de esta posa de secado es enviada al circuito de lavado a contracorriente.

Fundición

El precipitado obtenido del filtro prensa es secado, pesado y muestreado, para calcular los fundentes necesarios para su fundición. La mezcla es homogenizada y alimentada a un horno basculante obteniéndose oro bullion, donde el producto es refundido hasta

obtener el producto final con una ley de oro más plata mayor a 95%. Los productos refundidos aceptados son muestreados, pesados y empacados para ser comercializados.

Las escorias resultantes, son tratadas mediante molienda y gravimetría con el fin de recuperar el oro que no salió en proceso de fundición. El concentrado de la gravimetría es refundido y los relaves son enviados al circuito de molienda primaria de la planta. En total la recuperación promedio es del 99.65%.

Planta de Filtrado de Relaves

La pulpa que es liberada del último espesador del lavado a contracorriente, alimenta a un tanque que acondicionamiento para su respectiva filtración, obteniéndose un relave filtrado, el cual será enviado al depósito de Livias para su disposición y compactación. Mientras que el agua filtrada sirve para el acondicionamiento y el sobrante es enviado al circuito de lavado a contracorriente.

Figura N° 3-8: Diagrama de flujo de planta Maraón

Fuente: Elaboración propia

3.5 Marco teórico del color y el mineral

3.5.1 Mineral

(A. Betejtin, 1970) denomina minerales a los componentes de las rocas y menas, que se diferencia por su composición química y propiedades físicas (brillo, color, dureza y otros). Visto genéticamente, los minerales son combinaciones químicas naturales, ocasionalmente elementos nativos, producto de distintos procesos físicos y químicos que ocurre en la corteza terrestre. Asimismo, (Klockmann & Ramdohr, 1947) sostienen que, un mineral debe cumplir las siguientes cualidades, las cuales son: homogeneidad en cualquiera de sus partículas; segundo, ser de origen natural, es decir es el resultado de los procesos formativos de la naturaleza. Para (J. Vidal, 1984) la expresión de homogeneidad permite excluir de la definición de rocas, ya que son formadas por la agrupación de dos o más minerales, que en conjunto son una mezcla heterogénea. Además, (Young, 1961) hace referencia a la mena, la cual el geólogo y el mineralogista emplean para designar los minerales de los que se obtiene metales. El minero, en cambio, utiliza este vocablo para designar cualquier sustancia mineral a la cual puede obtenerse un metal y tener un margen económico. Por lo tanto, mineral, en términos estrictos, es un compuesto o elemento de composición definida y homogénea. Esto se confirma al consultar el Handbook de minerales de los compuestos presentes según la paragénesis descrita en acápites anteriores. Ver *ANEXO 3: HANDBOOK OF MINERALOGY*.

Para nuestra investigación, nos referiremos mineral, al conjunto de minerales que se entrega de las labores de cateo libre a Planta de beneficio. Por lo que, nuestro mineral de interés es el oro, pero este mineral viene acompañado con otros minerales, lo cual hace que en conjunto sea una mezcla heterogénea.

3.5.1.1 Mineral oxidado

(Young, 1961) sostiene que la meteorización y la acción de las aguas superficiales altera la mayoría de los minerales de las menas y los convierte total o parcialmente en óxidos, carbonatos o sulfatos. Para (A. Betejtin, 1970) sustenta que las reacciones químicas que se producen en la corteza terrestre son debido al oxígeno, el cual se encuentra como oxígeno libre (21% del volumen del aire) y es ligeramente soluble en agua. Lo que provoca la meteorización, haciendo que el oxígeno actúe como agente oxidante.

3.5.1.2 Mineral sulfurado

Para (Young, 1961) los minerales que no han sufrido la influencia de la meteorización y que se caracterizan por la presencia de sulfuros, son llamados minerales no oxidados o minerales sulfurados, cuando los sulfuros están en proporción mayoritaria. Asimismo, (Klockmann & Ramdohr, 1947) a esta clase de minerales pertenece todas las combinaciones no oxigenadas de los metales y metaloides, que en su mayoría se caracteriza físicamente por su aspecto de mineral metálico, peso específico elevado y, por lo general, por su opacidad o color gris oscuro.

Del siguiente Figura se **interpretará termodinámicamente** cómo un sulfuro pasa a óxido debido al oxígeno del aire. De las líneas discontinuas, la parte interna, hace referencia a la estabilidad del agua en donde la parte superior es el equilibrio entre el agua y el oxígeno del medio y la línea inferior el equilibrio entre el agua y el hidrogeno. Las líneas continuas indican los límites de equilibrio entre una especie y otro del hierro con el azufre y el agua.

Seleccionamos el rango de pH [6 a 7] por ser condición ambiental. En este caso, el oxígeno se reduce a agua y hace que la **pirita (FeS_2)** se oxide a **hematita (Fe_2O_3)**.

Lográndose demostrar que un sulfuro pasa a óxido debido al oxígeno del aire en presencia del agua.

Figura N° 3-9: Eh - pH del Fe-S-H₂O

Fuente: (Havlik, 2008)

3.5.1.3 Mineral – enfoque económico

En un enfoque económico, el mineral se conoce como ley de corte o “cut off”. (Rendu, 2008) sostiene que la ley de corte mínimo es la que tiene en cuenta a los costos operativos. Por lo que, esta ley de corte permite tomar la decisión de que material será considerado mineral para procesar y cual será ganga o material estéril sin ningún beneficio económico acorde al procesamiento que se tenga implementado. El autor muestra la deducción de la ley de corte mediante:

$$U_{ore}(x) = x \cdot r \cdot (V - R) - (M_o + P_o + O_o)$$

x = ley del metal (oz/ton)

r = recuperación de extracción del material (%)

V = valor de una unidad de producto valioso (\$/oz)

R = costos de refinación (\$/oz)

M_o = costo de extracción por tonelada métrica de mineral (\$/ton)

P_o = costo de procesamiento por tonelada métrica de mineral (\$/ton)

O_o = costo general por tonelada métrica de mineral (\$/ton)

$$U_{waste}(x) = -(M_w + P_w + O_w)$$

M_w = costo de extracción por tonelada métrica de relave (\$/ton)

P_w = costo de procesamiento por tonelada métrica de relave (\$/ton)

O_w = costo general por tonelada métrica de desmonte (\$/ton)

Igualando los costos asociados del mineral y del relave

$$U_{ore}(x_c) = U_{waste}(x_c)$$

Por lo tanto, la ley de corte mínima (X_c) será:

$$x_c = \frac{[(M_o - M_w) + (P_o - P_w) + (O_o - O_w)]}{[r \cdot (V - R)]}$$

De la fórmula, el numerador representa la diferencia entre la extracción, el procesamiento y los costos generales incurridos al tratar el material como mineral y los incurridos cuando se trata el mismo material que los desechos o relave. Mientras que, en el denominador, **la recuperación** de metal **r** debe ser la que se aplica al material de grado x_c , que no es necesariamente igual a la recuperación promedio para todo el material enviado a la planta de procesamiento.

3.5.1.4 Mineral – enfoque geológico, minero y metalúrgico

A modo práctico, el mineral para un geólogo, éste lo subdivide en Recursos y Reservas, en donde la primera categoría está relacionada a los minerales inferidos, indicado y medido. Los que, al realizar una mayor investigación es estos minerales previamente descrito, pueden subir de rango y en algunos casos convertirse en Reservas, la cual se subdivide de mineral probable y mineral probado. Mientras que para el minero el mineral está asociado a su capacidad de extracción, la cual está relacionado a la **dilución planeada** del mineral. Finalmente, para el metalurgista el mineral es lo que el minero entrega después de haber extraído y acarreado hasta las instalaciones de planta de beneficio (Sinclair & Blackwell, 2002). En el siguiente Figura se observa una veta de un cierto mineral de interés y sus respectivos enfoques de mineral.

Figura N° 3-10: Enfoques del mineral

Fuente: (Sinclair & Blackwell, 2002)

3.5.1.5 Dilución de mineral

La RAE, define dilución como la disolución de algo por medio de un líquido. Asimismo, precisa que la dilución es la disminución de la concentración de una disolución añadiendo más disolvente. Por último, manifiesta que es hacer que algo pierda importancia o intensidad hasta no poderse percibir. De estos, las dos primeras tienen una connotación química. Sin embargo, en el campo de los minerales podríamos adoptar la tercera definición. En la actividad minera, la dilución tiene diferentes definiciones, (T. Matthews, 2015) por ejemplo sostiene que la dilución y la pérdida de mineral son dos conceptos críticos en esta actividad, ya que abarca desde la ley o contenido de mineral, los tonelajes y la producción real. Del mismo modo, mantiene que la dilución es el aumento de volumen y la reducción de la ley, causados por múltiples factores, entre los que destacan los de operación y humano. No obstante, la pérdida de mineral se describe como la reducción de los volúmenes de mineral en el proceso de minería debido a la inadecuada clasificación del mineral como material estéril o desmonte en el proceso de control del mineral. Por lo tanto, la dilución se toma como un aumento en toneladas de mineral sin cambio en el contenido metálico (y por lo tanto da como resultado una reducción en la ley). Mientras que, la pérdida de mineral se toma generalmente como una reducción en toneladas en la ley promedio del mineral, y por lo tanto da como resultado una reducción en ambas toneladas y contenido metálico.

Sin embargo, (M. Javier, 2014), asegura que **la dilución es un concepto humano, ya que la naturaleza no diluye nada sólo establece su equilibrio dinámico, el cual está gobernado por su mineralización.** Por lo que, la dilución es un indicador del rendimiento del tipo de tecnología aplicada para obtener cada mineral valioso del yacimiento. Es así cómo, el autor toma a la dilución como la pérdida de concentración

del metal o mineral de interés mediante la introducción de otros materiales de no interés que hace que disminuya la concentración. Por lo general, la dilución se estima utilizando diferentes suposiciones para diferentes tipos de cuerpos de mineral. Los resultados se basan en un solo número. Normalmente, la caracterización del mineral da una tasa o porcentaje de dilución y hace que la utilización del mineral sea extremadamente limitada.

3.5.2 Color

3.5.2.1 Color

El color tiene diferentes definiciones, por ejemplo: es la sensación producida por los rayos luminosos que impresionan los órganos visuales y que depende de la longitud de onda. Mientras que, en un sentido físico, es la propiedad de la luz transmitida, reflejada o emitida por un objeto que depende de su longitud de onda (RAE 2017).

En física, en el apartado de la óptica, se estudia a la luz y a los fenómenos luminosos. De ello, el tema de descomposición de la luz blanca¹¹ o luz solar, siendo uno de los primero Sir Isaac Newton en realizar dicha prueba en ciertas condiciones (1672), descubrió que los colores producidos al atravesar la luz solar sobre un prisma, el espectro generado toma los colores que van desde el rojo pasando por el anaranjado, amarillo, verde, azul hasta el violeta. J. C. Maxwell, cien años después del descubrimiento de Newton, demostró que la luz estaba compuesta por un espectro electromagnético en donde se observa que la luz emitida por el sol está dentro de la región visible. Es así como, consideramos a la luz como una onda electromagnética, por ende, el color puede identificarse a través de su longitud de onda. Es decir, nosotros

¹¹ Entiéndase como la mezcla de todas las longitudes de onda el espectro visible

percibimos las ondas a través del color, por ejemplo, el azul tiene una longitud de onda más corta y el rojo una más larga. (Contreras, 2007).

Figura N° 3-11: Espectro electromagnético

Fuente: (Khan academy, 2017)

(Kitaigorodski, 1981) en su libro de *“Física para todos – Protones y núcleos”*, afirma que el ojo humano es un instrumento físico, ya que permite discernir decenas de miles de matices de colores, a distancias cortas y largas, de percibir las relaciones volumétricas de un objeto, así como tener la sensibilidad frente a las intensidades luminosas muy insignificantes, todas éstas son propiedades que hacen honor al instrumento de la más alta clase. Sin embargo, el ojo del hombre sólo es capaz de ver una pequeña porción del espectro. Asimismo, hace la analogía del ojo humano con un aparato fotoFigura.

La siguiente cita, (Kitaigorodski, 1981) describe cómo funciona el ojo humano y su visibilidad en el espectro visible:

“La imagen del objeto se proyecta a la pared posterior del ojo. El nervio óptico transmite esta sensación al cerebro. El ojo normal de una persona joven es capaz de examinar con detalle el objeto situado a una distancia no menor de 10 cm. A medida que avanza la edad, suele desarrollarse la presbicia¹² y esta distancia crece hasta 30

¹² Defecto de la visión

cm. Delante del cristalino¹³ se encuentra la pupila que hace las veces del diafragma del aparato fotoFigura. La abertura de la pupila puede variar dentro de los límites de 1,8 a 10 mm. El papel de la placa fotográfica en que se forma la imagen lo desempeña la retina cuya estructura es muy compleja. Bajo la retina se sitúa el epitelio del ojo que consta de células sensibles a la luz que se denominan conos y bastoncillos. El lector puede comparar el número de estas células con el de granos de bromuro de plata en la placa fotográfica. El número de células visuales supera cien millones. Por cuanto el hombre es capaz de distinguir colores, está claro que las células visuales poseen sensibilidad distinta respecto a las diferentes zonas del espectro.”

3.5.2.2 Sistema de color Munsell

Hasta finales del siglo XIX, la definición de “Color” se encontraba en una intersección entre la psicología, la fisiología y la física. Esto era, porque era una percepción psicológica generada por la acción fisiológica del ojo y las células nerviosas en respuesta a las propiedades de la luz física. En ese entonces, había una división epistemológica entre los físicos y los psicólogos. Pues, los enfoques divergentes de los físicos y psicólogos con los que trabajó Munsell tenían fuertes paralelismos con el desarrollo de la "objetividad" La forma en que Munsell estandarizó su procedimiento y mantuvo registros de su investigación recuerda el entrenamiento del ser científico. El sistema Munsell se puede ver como un compromiso viable entre los diferentes campos científicos, ya que era adecuado como herramienta para la experimentación psicológica, mientras que los físicos también podían aceptarlo debido a su naturaleza

¹³ Es una estructura del ojo humano que está situado detrás la pupila. RAE

cuantitativa, mensurable y replicable como la mejor opción hasta que los avances posteriores en la ciencia de la visión hicieran posible la especificación física de la coincidencia de colores.

El diseño del sistema Munsell lo hizo particularmente útil para aplicaciones en eficiencia industrial. Los chips o tablas de color hacen posible la identificación de colores de los productos, y el sistema de notación alfanumérica hace que la comunicación sea eficiente y consistente. El beneficio de un sistema de ordenamiento de color estándar y confiable para aplicaciones en ciencia, educación e industria puede verse como una atracción para ambos lados del debate sobre la definición de color. Munsell era consciente de esta ventaja y describió su trabajo a la Asociación Americana de Psicología como "una sólida base matemática para la descripción, comparación y clasificación de los colores". En abril de 1900, Munsell escribió que Amos Dolbear, físico de la Universidad de Tufts, elogió su trabajo por "arribar con mayor precisión y conveniencia que cualquier otro método inventado". Podemos suponer que Dolbear lo consideró "preciso" porque fue cuantificado y basado en pruebas múltiples, mientras que fue "conveniente" debido a su estructura alfanumérica. Asimismo, Dolbear elogiaba el sistema como "bello", ya que "se basa en pruebas físicas" y, además, que "elimina el sesgo personal y es una aproximación a un estándar que se puede representar a voluntad por números".

Sin embargo, el método de Munsell todavía era un compromiso: Clifford no consideraba que el sistema fuera perfecto. En su introducción, escribe: "No parece haber ninguna razón por la cual sus sugerencias no conduzcan a un sistema exacto y definido de elementos esenciales de color", lo que implica que el rigor podría mejorarse. Del mismo modo, Munsell registró a un vacilante Dolbear diciendo: "esta esfera carece de perfección desde un punto de vista físico (la fuente y la naturaleza de

la luz deben definirse, así como su reflejo)". Hemos visto que Dolbear aprobó los resultados numéricos y eliminando el "sesgo personal": lo que se supone que debe hacer la recopilación de datos de la máquina. Pero el sistema era solo "una aproximación a un estándar". No era perfecto para Dolbear porque ignoraba la fuente de luz física. Los debates sobre cómo definir el color fueron internacionales y no terminaron con la publicación del sistema de Munsell.

No obstante, el sistema de A. Munsell era parte del eventual compromiso entre físicos y psicólogos: la Optical Society of America (OSA) y luego la Comisión Internacional de Color (abreviada CIE para los franceses, "Commission Internationale de l'Éclairage") adoptaron una definición psicofísica de color. El sistema Munsell se acordó bien con esta definición, y después de las reuniones se publicó una fórmula para traducir los valores Munsell y los valores tri-estímulos CIE oficiales.

El hecho de que Munsell realmente creó las muestras que componen su sistema, a diferencia de los otros investigadores científicos del color de la época, significaba que el sistema podría ser probado físicamente con espectrofotómetros, registrado y refinado con avances en nuestra comprensión del color. Y, efectivamente, los cambios en las muestras de Munsell se han realizado a lo largo del siglo, en un diálogo de pruebas físicas y juicio visual.

En conclusión, Albert Munsell fue un profesor de arte, el cual tuvo como objetivo, un tanto particular entre los artistas, el querer expresar de manera científica los parámetros de los elementos del color, los cuales utilizaba en su trabajo y sobre todo para enseñar a sus alumnos, logrando desarrollar un sistema que hasta hoy sigue utilizándose. El afirmaba que el color puede ser descrito mediante un sistema apropiado, basado en el **tono, claridad y croma (hue, value y chroma)** de nuestras sensaciones. En donde,

proponía un sistema que estableciera las tres dimensiones del color y midiera cada una de ellas mediante una escala apropiada.

Figura N° 3-12: Diagrama Munsell

Fuente: (Cochrane, 2014)

Las ventajas de su sistema fueron descritas por él mismo como:

- Reemplazar definiciones vagas y abstractas del color por una notación definida.
- El nombre de un color autodefine su grado de tono, claridad y croma.
- Cada color se puede registrar y comunicar mediante un código.
- Se puede escribir la descripción de un color y verificar mediante pruebas físicas.
- Los colores nuevos no perturban la clasificación ordenada, ya tienen un lugar.

3.5.2.3 Medición del color

Mediante la norma ASTM D1535 – 08 “Standard Practice for Specifying Color by the Munsell System”, se tiene en cuenta qué

Definición de términos:

La notación de Munsell se escribe como una combinación de letras y números mediante, la cual se puede especificar el color de un objeto con respecto a la tabla de

colores de Munsell, donde el **tono (hue) H**, el **valor (value) V** y el **croma (Chroma) C** se **escribe de la forma H V/C**.

El **Tono(hue)**, es el atributo de la percepción del color mediante el cual se juzga que un color sea rojo, naranja, amarillo, verde, azul, púrpura o intermedio entre pares adyacentes de estos, considerado en un anillo cerrado. Ver *Figura N° 3-12*. Es decir, la tonalidad de Munsell es para indicar el matiz de una muestra vista a la luz del día.

Valor (value), atributo del color utilizado en el sistema de color Munsell para indicar la claridad de una muestra vista a la luz del día, en una escala que se extiende de 0 para ideal negro a 10 para un blanco ideal, en pasos que son visualmente aproximadamente igual en magnitud. los colores acromáticos o neutrales se designan como N, seguidos de la notación de valor, por lo ejemplo: N5. Ver *ANEXO 2*.

El **croma (Chroma)**, hace referencia al atributo de color utilizado para indicar el grado de separación del color de un color neutro de la misma claridad, mismo valor V. Es decir, el croma de Munsell, es el atributo de un color utilizado para indicar el grado de desviación de un color de un gris del mismo valor de Munsell.

Percepción del color Munsell en una superficie sólida, es una representación espacial de colores en forma de un sistema de coordenadas cilíndricas basado en los tres atributos de percepción: **tono, claridad y croma**. Este sólido (ver *Figura N° 3-12*) forma la base de la notación de Munsell en la que el matiz de Munsell corresponde al hue, el valor (value) de Munsell corresponde a la claridad y el croma de Munsell corresponde al croma. La dimensión central del eje vertical representa colores neutros, que van desde el negro en la parte inferior, pasando por una gradación de grises, hasta el blanco en la parte superior.

Preparación de muestra de prueba

Esta norma no cubre la preparación de especímenes de prueba. Si la preparación es necesaria, consulte otras normas de que cubran estas necesidades.

Notación Munsell

Condiciones de iluminación y visualización:

Las muestras deben ser examinadas por un observador con visión de color normal. Se debe aplicar un iluminador de luz diurna como se describe en la Práctica D1729. Sin embargo, si dicho equipo de iluminación no está disponible, se puede usar luz natural para obtener notaciones que tengan la precisión adecuada para muchos propósitos.

Procedimiento:

Si se tiene el equipo de iluminación diurna, siga las recomendaciones de iluminación y visión de la norma D1729. Caso contrario, al determinar la notación de Munsell con luz natural, seleccione una ventana a través de la cual el sol no esté brillando. Coloque la muestra en un medio neutral de fondo gris a blanco, donde se ilumine uniformemente con la luz del día.

Figura N° 3-13: Diagrama de matiz, valor y croma de Munsell

Fuente: (Chico R.J, 1988)

Tono (H): Estime el tono de la muestra mediante la interpolación entre tablas del valor de Munsell más cercano, por ejemplo, **5R**.

Valor (V): encuentre las tablas entre las cuales se encuentra el valor de la muestra. Estime el valor de la muestra al décimo más cercano al intervalo de un valor de paso entre niveles de valores adyacentes y regístrelo, por ejemplo, **4**

Chroma (C): mueva las máscaras para presentar colores sucesivos del mismo croma y, mediante interpolación o extrapolación, determine el croma de Munsell, ejemplo, **6**

La notación de Munsell para el matiz H, el valor V y el croma C, se escribe en la forma H V/C. Usando los ejemplos y el *Figura N° 3-13* dados, la notación Munsell se escribiría 5R 4/6 y su color correspondiente se presenta a continuación.

Figura N° 3-14: Tabla Munsell para rocas

Munsell Color						Rock-Color Chart 2009 Revision					
5R 8/2 Grayish Pink	5R 7/4 Moderate Pink	5R 6/2 Pale Red	5R 6/6 Light Red	5R 5/4 Moderate Red	5R 4/2 Grayish Red						
5R 4/6 Moderate Red	5R 3/4 Dusky Red	5R 2/2 Blackish Red	5R 2/6 Very Dark Red	10R 8/2 Grayish Orange Pink	10R 7/4 Moderate OrangePink						
10R 6/2 Pale Red	10R 6/6 Moderate Reddish Orange	10R 5/4 Pale Reddish Brown	10R 4/2 Grayish Red	10R 4/6 Moderate Reddish Brown	10R 3/4 Dark Reddish Brown						
10R 2/2 Very Dusky Red	5Y 8/4 Moderate Orange Pink	5YR 7/2 Grayish Orange Pink	5YR 6/4 Light Brown	5YR 5/2 Pale Brown	5YR 5/6 Light Brown						
5YR 4/4 Moderate Brown	5Y 3/2 Grayish Brown	5YR 3/4 Moderate Brown	5YR 2/2 Dusky Brown	10YR 8/2 Very Pale Orange	10YR 8/6 Pale Yellowish Orange						
10YR 7/4 Grayish Orange	10YR 6/2 Pale Yellowish Brown	10YR 6/6 Dark Yellowish Orange	10YR 5/4 Moderate Yellowish Brown	10YR 4/2 Dark Yellowish Brown	10YR 2/2 Dusky Yellowish Brown						
5Y 8/4 Grayish Yellow	5Y 7/2 Yellowish Gray	5Y 7/6 Moderate Yellow	5Y 6/4 Dusky Yellow	5Y 5/2 Light Olive Gray	5Y 5/6 Light Olive Brown						

Fuente: (Munsell Color, 2009)

3.5.2.4 Color de mineral

Al observar un mineral, la primera impresión es la visual, la cual es producida por el desigual poder reflector de la superficie de los minerales o de la absorción de las radiaciones que experimenta algunos de ellos. Cuando un mineral rechaza todas las radiaciones se dice que es blanco. Mientras qué, cuando absorbe totalmente todas las radiaciones, se dice que es negro. Por lo tanto, cuando un mineral absorbe casi todas las radiaciones y rechaza solamente las correspondientes a un determinado color, entonces se dice que posee dicho color. Sin embargo, los minerales presentan colores variados que puede deberse a: primero, a un color propio, el cual depende de la composición del mineral en un estado casi puro; segundo, a un color accidental, que depende de algunas sustancias extrañas que se mezclan al mineral permitiendo la combinación de colores; y, por último, el color movable, el que varía con las diferentes posiciones en que se mira al mineral. Además, en todo color se debe atender a su especie (color base) y a su intensidad, el cual puede llamarse pálido, claro, oscuro. (J. Vidal, Generalidades sobre los minerales, 1984).

(A. Betejtin, Propiedades de los Minerales, 1970) sostiene que el problema de la coloración de los minerales es que es complejo. Aleksandr Fersman, geoquímico y mineralogista, en su libro *“Los Colores de los Minerales”* (1937) realizaba los primeros intentos de relacionar los colores con los compuestos naturales y sus particularidades cristaloquímicas¹⁴. De los compuestos químicos naturales se distingue tres tipos de coloración por su origen: 1) idiocromático, 2) alocromático y 3) pseudocromático. Donde el primero, la coloración se debe a su origen de su formación, ya que en su composición hay un cromóforo, algún elemento químico colorante, como por ejemplo el Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni es decir la familia del hierro y otros menos

¹⁴ Disciplina que estudia la constitución y el comportamiento químico de la materia cristalina.

frecuentes como el W, Mo, U, Cu y Th. El segundo, se refiere a la coloración de los minerales que va ligado a mezclas mecánicas ajenas de fina dispersión con cromóforos de uno y otro color. Los minerales que poseen una coloración de este tipo no son otra cosa que cristalosoles, es decir disoluciones cristalinas coloidales. Como por ejemplo el cuarzo, el cual generalmente es incoloro, pero a veces aparece con una coloración violeta (amatista), rosada, amarilla – parda (de los óxidos de hierro), dorada (citrina), gris o de humo, negra densa (morión) y, por fin, blanca – leche. Por último, el pseudocromatismo, en donde se observa que algunos minerales presentan un “juego de colores” determinado por la interferencia de la luz incidente, debido a su reflexión de las superficies internas de las hendiduras del clivaje o a veces de la superficie de algunas inclusiones. Como, por ejemplo, el mineral de cobre bornita o conocido como “pecho de paloma” por presentar un juego de colores como el arco iris.

Asimismo, (Klockmann & Ramdohr, 1947) aseguran que el fenómeno de la coloración de los minerales está fundamentado 1) por la luz refractada, en donde la luz atraviesa un cristal, y 2) la luz reflejada, la cual no permite el paso al llegar a la superficie del mineral. El primer fundamento, “el color en una luz refractada” la luz experimenta en su camino un debilitamiento, en grado variable de una sustancia a otra. Estos compuestos son transparentes “como el agua”, ejemplo de ello son algunos cristales de roca como la sal común, fluoritas y el diamante. Además, sí se tuviera placas de cierto grosor de estos cristales con una pureza ideal, se advierte que una parte de la luz desaparece y a esto se le dice que la luz a sufrido una **absorción**. En muchos cuerpos la absorción no es la misma para todos los colores, ya que las longitudes de onda son más, fuertemente, absorbidas que otras. Es decir, la luz blanca que incide pierde a su paso por el cuerpo los colores dados por aquellas longitudes de onda, total o parcialmente (bandas de absorción), y el cuerpo aparece coloreado. Cuando se sabe la

dirección de máxima absorción, se puede predecir el color resultante. Es así como, la absorción es en algunos casos propiedad que se presenta en algunas sustancias de completa pureza (el rojo de las platas rojas, el azul de la azurita), o bien puede estar producida por la interposición de sustancias extrañas, como, por ejemplo: el caso del sulfuro de cinc (ZnS), que puro es incoloro, pero las blendas naturales se presentan amarillas, pardas, verdosas, negras entre otros, y esto ocurre cuando llevan ciertas proporciones de Fe, Cd, Mn. De lo descrito anteriormente, proviene la división de minerales en idiocromáticos (coloreados) y alochromáticos (teñidos). Asimismo, en este contexto se dice que un mineral es opaco cuando gran parte del espectro visible es absorbido por una delgadísima placa en él. El segundo fundamento, “el color en la luz reflejada” se basa en un tanto por ciento de la luz incidente en una superficie lisa, de la cual se obtiene la cantidad de luz reflejada. La influencia de la longitud de onda sobre el color se traduce en que la impresión del tono es diferente, según se observe a la luz del día, de una lámpara, a media luz o con la lámpara de minero. Ciertamente, esto es notable en la coloración de algunas alexandritas o mineral de crisoberilo (BeAl_2O_4), pues a la luz diurna son verdes y a la de una lámpara, un rojo característico. Del mismo modo, al apreciar los colores de un mineral tropezamos con la dificultad de la existencia de pátinas¹⁵, cuyos colores nada tienen que ver con los propios del mineral, pero suelen ser muy característicos. Estos recubrimientos delgados, los cuales se presentan superpuestos a los colores del mineral, con mucha frecuencia son producto de oxidación de aquel mineral (la limonita, $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$, sobre siderita, FeCO_3) y en otras ocasiones no guardan ninguna relación. Los colores de los minerales no siempre son permanentes, especialmente ocurre esto en los colores diluidos. Es decir, los minerales varían de color idiocromático por las transformaciones químicas

¹⁵ Coloración producida por la meteorización (oxidación) sobre las superficies expuestas al aire libre. (D. Burga, 2011, pág. 624)

progresivas que sufren a través del tiempo y condiciones. Así, el realgar(AsS) pasa de rojo a amarillo por la acción de la luz, debido a que se convierte en oropimente (As₂S₃). Otro ejemplo, aunque con mucha más lentitud es el azul de la azurita Cu(OH)₂·2(CuCO₃) que va cambiando en el verde de la malaquita Cu(OH)₂·(CuCO₃).

3.6 Estado del arte

En términos generales en los siguientes párrafos se busca hacer una referencia sobre el uso de las tablas de colores de Munsell como herramienta de caracterización, dependiendo el tipo de actividad e industria.

3.6.1 Estado del arte N.º 1

(R.A. Viscarra & et al, 2005) en su trabajo de “*Modelos de espacio de color para la ciencia del suelo*”, sostiene que el color del suelo es una propiedad importante, ya que los científicos de este campo lo utilizan con frecuencia para identificar y clasificarlos. También, lo usan como un indicador de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de campo, así como de los procesos que envuelve su evolución. Las mediciones del color del suelo se hacen comúnmente usando las tablas de colores del suelo de Munsell. Sin embargo, existen otros modelos de espacio de color como: Munsell H V/C; RGB, coordenadas RGB; CIE coordenadas XYZ; CIE L u*v y Helmholtz. Asimismo, **sostiene que el tipo de modelo de color a usar dependerá del propósito**. Por ejemplo, si el color del suelo se utiliza con fines descriptivos, entonces el sistema Munsell H V/C seguirá siendo el apropiado. Además, describen la preparación de la muestra de suelo para las mediciones de color. En donde, se coloca aproximadamente 20 cm³ de muestra molida, secada al aire, en placas de Petri de 30 cm³. En este estudio se realizaron las medidas del color del suelo de cada muestra en estados secos y húmedos. La medición se realizó después de una hora, después de

preparar las muestras con el fin de minimizar el brillo y reducir la reflexión especular y otras incoherencias de medición. Asimismo, se investigó la relación entre el color del suelo y el carbono orgánico del suelo (OC), puesto que son deseables para la agricultura. Cabe resaltar, que las técnicas convencionales para cuantificar OC de suelo son costosas, lentas y en ocasiones inexactas. Por lo que, el color del suelo se puede usar para cuantificar el OC del suelo. De esto, existe una serie de estudios que informan las relaciones entre el color del suelo y el OC del suelo. La mayoría de estos tienen que ver con el sistema Munsell H V/C. Por ejemplo, (D. Franzmeier, 1988) informó que las relaciones entre la materia orgánica del suelo y el valor (V) de Munsell y el croma (C) tienen un coeficiente de determinación o $R^2 < 0.48$. Del mismo modo, (D. Schulze & et al, 1993) informaron una relación débil ($R^2 = 0,31$) entre el valor húmedo de Munsell y el suelo OC para uno de textura variable. Sin embargo, (M. Konen & et al, 2003) reportaron un valor R^2 de 0.63 para la relación entre el valor (V) seco de Munsell y el OC del suelo. Asimismo, dichos autores utilizaron un medidor de croma para desarrollar relaciones entre el color del suelo, el OC del suelo y la textura. Mostraron relaciones logarítmicas entre la reflectancia, el valor de Munsell, el croma de Munsell y el OC del suelo. Los valores R^2 de sus relaciones variaron de 0.68 a 0.77. Como conclusión, de la investigación, se logró demostrar que el hecho de que un suelo sea más oscuro contiene mayores cantidades de OC en el suelo, que uno de color más claro. Este oscurecimiento del suelo con mayor contenido de OC se debe al efecto de la materia orgánica saturada y a las variaciones en la composición y cantidad de ácido húmico negro (D. Schulze & et al, 1993). Los materiales orgánicos en el suelo contribuyen al color del suelo a través de la formación de complejos organo-minerales.

3.6.2 Estado del arte N.º 2

El profesor del departamento de geología de la Universidad Kent State, Niel A. Wells, en su trabajo titulado “*Evaluación cuantitativa de las medidas de color: Parcelas de dispersión estereoscópicas triaxiales*”. Resume qué la mayoría de los geólogos, con demasiada frecuencia, recolectan muchas mediciones de color, pero hacen poco uso con ellas cuantitativamente. (N. Wells, 2001), sostiene que el color es una de las características que impresiona a primera vista en las rocas sedimentarias y de las que podía ser muy útil para su interpretación. Pero, la voluminosa investigación a lo largo de los años ha demostrado que el color es un tema difícil y complejo, ya que es estudiado por la física, la bioquímica, la neurobiología, la psicología, y la geología. Por lo que, en cada campo de investigación tendrá sus propias particularidades y bemoles. En geología se hace uso de libros de colores de Munsell para nombrar el color, especialmente la GSA **Rock Color Chart** (Goddard et al., 1948). Sin embargo, estos pueden estar sujetos a un error de observación, incluido el daltonismo, y pueden verse influenciados por cambios en la iluminación ambiental, humedad de la muestra, gráficos de colores sucios o descoloridos, etc. Por lo que, para el autor, es evidente que las mediciones se realice con espectrómetro, para que las mediciones concuerden con los colores de Munsell logrando que sean más precisas y exactas (J. Torrent & V. Barron, 1993) y (D. Post & et al, 1993). Aun así, estas mediciones estarán sujetas a problemas de instrumentación como la calibración, la sensibilidad a la longitud de onda diferencial, lentes sucias y otros. Por otro lado, la interpretación es lo que debe entenderse, ya que el color observado puede ser generado a partir de colores aditivos (adición de haces de luz), colores sustractivos (haces de luz filtrante) y mezclas de pigmentos, y aún no hay evidencia de cómo se relacionan con los colores de la roca. Asimismo, existen los colores metaméricos, los cuales hacen referencia a que dos muestras de color parecen ser iguales en una situación

dada y diferentes en otras. De ello, el metamerismo empeora aún más porque el color tiene muchas causas físicas diferentes. (Nassau, 2001) enumera alrededor de 15 causas del color (con cierta arbitrariedad porque algunas causas podrían combinarse o subdividirse aún más, según las preferencias del investigador). Además, Nassau explica que la causalidad del color es tan compleja porque el espectro de IR – luz UV visible se extiende más o menos a la transición en donde la radiación despoja los electrones de los átomos y calienta el material. Sin embargo, el color que percibimos de una muestra mineral o de suelo depende de los diferentes espectros de las longitudes de onda que golpean la muestra, los reflejados por ella (reflejo especular), aquellos que dispersa (reflexión difusa), aquellos que absorbe y de los que transmite. Todo esto significa que dos tonos que parecen ser idénticos en una situación pueden tener diferentes causas y/o pueden verse muy diferentes cuando se ven en diferentes condiciones. Asimismo, en la interpretación geológica de muchos colores de roca ocurren ciertos problemas de convergencia, ya que existen muchos procesos y caminos diferentes para el mismo resultado final como el metamerismo. Por ejemplo, cuando se observa un lecho rojo, la pregunta es “¿por qué se volvió rojo?” y las respuestas podrían ser que se haya debido a la meteorización, por diagénesis tardía o temprana, durante la deposición (ya sea en una llanura de inundación tropical o en el mar profundo) o porque el material original ya era rojo. En resumen, la interpretación geológica del color es casi inevitablemente problemática. A pesar de todo esto, la notación del color Munsell es para mostrar y evaluar datos del color que se presenta en la naturaleza.

Como reflexión del autor, asegura que, un problema fundamental con este sistema es que es demasiado engorroso, porque un científico, en campo, el cual se enfrenta a un fenómeno confuso con una visión insuficiente normalmente recurre a la recopilación de muchos datos, a la ejecución de algunas estadísticas y a la mayor cantidad posible de

diagramas de dispersión, pero con el color, se ha tendido a no hacerlo. Ciertamente recopilan e informan una gran cantidad de mediciones de color, la mayoría, pero no del todo utilizando el sistema de color Munsell, y además no se hace casi nada con ellos. Raramente usan el color para interpretaciones que sean amplias y generales, por lo que la mayoría de estos datos se desperdician. En particular, los geólogos, muy raramente, hacen comparaciones detalladas de rangos de valores de color o análisis de grados de uniformidad o agrupamiento o fortalezas de asociaciones de color para diferentes poblaciones. Por lo que, sólo se utiliza estas mediciones como simples adjetivos en vez de datos cuantitativos. Esto puede deberse a que el color es demasiado problemático, porque la notación de color Munsell hace uso de tres parámetros independientes en un formato alfanumérico mixto. No obstante, el profesor (N. Wells), usa estos tres parámetros de los colores de Munsell (matiz, claridad y croma) para trazar de manera útil diagramas de dispersión estereoscópica 3D (es decir, Gráficos XYZ que utilizan la profundidad estereoscópica para representar la tercera dimensión). La presentación gráfica de estas tres variables en un diagrama permite realizar comparaciones visuales rápidas y sencillas de rangos, agrupamiento y valores absolutos de colores, lo cual permite caracterizar las **diferentes formaciones, suelos o tipos de rocas**. Aunque el tema de los colores sedimentarios parece demasiado complejo como para hablar de campos de color. A modo de diagnóstico para entornos deposicionales específicos, el autor se basó en estudios en los estratos marinos, litorales y terrestres del Eoceno en el centro-norte de Pakistán, mostrando cuán fácil estos diagramas, los estereoplots, pueden demostrar rangos de color asociados con algunos tipos de suelo y con algunas facies en formaciones específicas.

3.6.3 Estado del arte N.º 3

El doctor Manuel Sánchez et al. en su trabajo titulado “*Cambios en el color del suelo por sulfurización inducida por un sedimento de superficie pirítica*”. Argumenta que los colores son ampliamente utilizados para describir los minerales de hidroxisulfato ($\text{Metal} + \text{OH}^- + \text{SO}_4^{2-}$) y de suelos de sulfato ácido, pero rara vez se estudia un proceso activo de sulfurización. Entendiéndose, como un proceso de formación de suelo en el que algunos minerales de sulfuro se oxidan, debido al ácido sulfúrico producido y de los minerales de sulfato que se forman a partir de los productos de la disolución inicial. Siendo los sulfatos ferrosos primeros en formarse y luego oxidarse, rápidamente debido a su inestabilidad, a sulfatos férricos, que a su vez pueden hidrolizarse parcial o totalmente para formar hidroxisulfatos y/o óxidos de Fe, como por ejemplo el mineral de schwertmannita ($\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6\text{SO}_4$), jarosita ($\text{MFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$) y goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), de las que dependen del pH y de la actividad del sulfato en la reacción. Además, de los modelos biogeoquímicos de (J. Bigham & E. Murand, 1997) y (E. Murand & P. Rojik, 2003) estimaron un rango de pH de trabajo de 1.5 a 5.0 y donde las concentraciones de sulfato son: $[\text{SO}_4^{2-}] > 3000 \text{ mg/l}$ para la jarosita; $[\text{SO}_4^{2-}]$ entre 1000-3000 mg/l para schwertmannita; y $[\text{SO}_4^{2-}] < 1000 \text{ mg/l}$ para la goethita. (M. Sanchez & et al, 2015) en su investigación realizada tuvo como objetivo medir los colores espectrofotométricos de un suelo sulfurizado por sedimento pirítico durante 15 años (con 8 perfiles, 75 muestras), con el fin de determinar si el color podría ser empleado para identificar los nuevos materiales del suelo en ambientes de sulfato ácido. Donde logró demostrar que el color del suelo es útil para identificar un proceso de sulfurización en el curso del tiempo, ya que la oxidación y lixiviación del horizonte sulfídico gris oscuro dan como resultado un aumento progresivo del valor (value) de Munsell, el cual refleja la cantidad de Fe eliminado y la formación de sulfatos blanquecinos. El color

marrón amarillento marca el comienzo del horizonte sulfúrico en respuesta a la formación de minerales de Fe de schwertmannita. Asimismo, cuando una parte de este horizonte alcanza un pH de 2, la jarosita indica un nuevo horizonte amarillo. Los cambios a lo largo del tiempo en el valor, croma y matiz de Munsell medidos en las muestras del suelo están bien adaptados a las funciones crono-funcionales con un $R^2 = 0.84-0.97$. Por lo que, son índices medibles del grado de sulfurización.

3.6.4 Estado del arte N.º 4

(D. Kemp, 2014) en su trabajo, *“Caracterización colorimétrica con escáneres planos para imágenes de rocas sedimentarias”*, considera que el color de las rocas tiene un gran potencial para proporcionar información sobre su composición y de los procesos físicos y químicos que rigen su deposición. La medición, no destructiva, del color utilizando espectrofotómetros es una forma cada vez más popular. Sin embargo, el análisis digital de imágenes de fotografías centrales es otro método comúnmente utilizado para extraer el color y por ende su información, pero la aplicación de escáneres de plataforma para la medición directa del color de la roca no ha recibido mucha atención. Los estudios enfatizan la eficacia del escaneo de las rocas para su análisis estadístico y posterior correlación geoquímica. Como cualquier método, se basa en la precisión de la calibración de los equipos y la comprensión de sus limitaciones. El autor, presenta una metodología de calibración simple, en la que demuestra cómo los escáneres pueden caracterizar colorimétricamente las rocas sedimentarias. La técnica ofrece un análisis cuantitativo con un enfoque en el análisis del color que tiene una cierta ventaja a comparación de las tablas de colores Munsell de rocas. A modo experimental, (A. Gale & et al, 1999) presentó un conjunto de datos de valores de escala de grises de un afloramiento en el que utilizó un escáner de superficie plana. En dicho estudio, la variable fue la relación directa del carbonato a arcilla en una sucesión de tiza cretácea,

donde el afloramiento se mostró como un lecho pálido-oscuro. De los valores de la escala de grises del escáner se correlacionaron fuertemente con el contenido de Al_2O_3 y, por lo tanto, las variaciones de la escala de grises podrían interpretarse en términos de composición química. Del mismo modo, (D. Kemp & A. Coe, 2007) empleó un escaneo con cama plana para cuantificar el color de una roca del Triásico Tardío para el análisis ciclo-estratigráficos. Las variaciones de color en estas rocas estuvieron entre rojo y verde, los cuales se relacionan con el contenido de Fe^{3+} y Fe^{2+} . Como conclusión, se tiene que la medición del color utilizando escáneres planos proporciona de forma precisa, la construcción de conjuntos de datos adecuados para aplicaciones geológicas. Del mismo modo, representa una técnica cuantitativa, la cual es superior a la realizada con la tabla de colores de Munsell de rocas. La comparación directa de la metodología de escaneo con análisis de color usando un espectrofotómetro sugiere que la precisión y exactitud del método es potencialmente alto, aunque eso dependerá de la precisión del hardware utilizado.

3.6.5 Estado del arte N.º 5

Un estudio realizado por (A. Bonis & et al, 2017) titulada *“Diferentes tonos de rojo: la complejidad de los factores mineralógicos y físico químicos que influyen en el color de la cerámica”*. En su trabajo de investigación utilizaron dos materiales arcillosos de composición diferente, recogidos en la bahía de Nápoles, Italia, los cuales fueron dispersados en una atmósfera oxidante a diferentes temperaturas, dando como resultado diferentes tonos de color rojo, a los que quisieron evaluar su composición y correlación. La información mineralógica y microestructural sobre réplicas cerámicas se obtuvo por difracción de rayos X en polvo (XRPD). Sin embargo, estas técnicas, muy detalladas para una investigación mineralógica, son costosas y lentas. Para eso, se debe considerar otra técnica rápida y menos costosa. Entre estos, la espectroscopía de reflectancia en el

dominio espectral visible-infrarrojo cercano (vis-NIR, 350-2500 nm) es la técnica que se ha aplicado con éxito para caracterizar compuestos del suelo (carbono orgánico, minerales arcillosos, óxidos de hierro), arqueometría para el estudio de la pintura y raramente en cerámica. donde sólo se limitaba al análisis de decoración y esmalte. Para este estudio, el color de las cerámicas se evaluó cuantitativamente mediante colorimetría portátil en las coordenadas de espacio de color CIE L.a.b. Este enfoque se ha utilizado en gran medida para la determinación de cerámicas arqueológicas. El color también se evaluó mediante inspección visual utilizando la Tabla de colores de suelos de Munsell, tal como la realizan habitualmente los arqueólogos y también en varios estudios arqueométricos. Esto podría ser muy útil para verificar rápidamente los cambios de color de los cuerpos cerámicos a cada temperatura de cocción. Un método alternativo para la determinación del color de las muestras de cerámica podría basarse en la transformación de la reflectancia espectral visible (350-780 nm), que puede convertirse tanto en CIE L * a * b * como en las notaciones de Munsell. Como se indicó anteriormente, este enfoque ya se ha utilizado en estudios mineralógicos, pero nunca, al menos de acuerdo con nuestra información, en los relacionados con la cerámica. Para eso, se ha utilizado en el presente estudio y su resultado se ha comparado con los derivados de la colorimetría tradicional.

Las curvas espectrales obtenidas, originalmente, se muestrean entre 370 y 780 nm (dominio visible) y se transforman en los valores triestímulo X, Y y Z según la Comisión Internacional de l'Eclairage (CIE, 1931) utilizando SpecPro. Los valores de los triestímulos se convirtieron a las notaciones de color Munsell (matiz, valor, croma).

El tono rojizo de la cerámica es debido a la hematita, ya que su nucleación está estrictamente relacionada con la temperatura de cocción y la composición química de las materias primas. De esto, se encontró que a una baja concentración de CaO permitió

que la hematita se formara en mayores cantidades, proporcionando un tono rojizo más intenso a altas temperaturas de cocción (más de 950 ° C) y a la temperatura más alta (1100 ° C), todas las muestras mostraron un color más oscuro debido al aumento del tamaño de las partículas de óxido de hierro. En conclusión, en lo que respecta a las notaciones de color de Munsell, los datos medidos a través de la reflectancia vis-NIR son más precisos y detallados en comparación con los adquiridos mediante inspección visual en los gráficos de matiz constante. De hecho, para el autor, las comparaciones visuales son subjetivas y propensas a los errores asociados con las diferencias en la percepción del color entre los individuos y los efectos de las variaciones en las condiciones de iluminación. Sin embargo, las principales diferencias de color, relacionadas con la temperatura y composición de cocción, también se distinguen por comparación visual.

3.6.6 Estado del arte N. ° 6

El Dr. J. Dorador y otros, del departamento de estratigrafía y paleontología de la Universidad de Granada, en el trabajo titulado *“Tratamiento de imagen digital de alta resolución para análisis de color en núcleos de IODP¹⁶ Expedición 339 características litológicas inminentes e influencia bioturbacional¹⁷”*. Muestran el análisis de color que realizaron en núcleos seleccionados de los Sitios U1385 y U1389 de la IODP Expedición 339, en España, en donde se basaron en un tratamiento de imagen digital de alta resolución desarrollado recientemente para explorar su relación con características litológicas. La diferenciación entre tipos de depósitos tiene un interés particular en el contexto de la evolución del agua de salida mediterránea (MOW) y los procesos de deposición relacionados, cuyo estudio fue uno de los objetivos principales de la

¹⁶ Internacional Ocean Discovery Program

¹⁷ Alteraciones producidas en el sedimento por la actividad de seres vivos

Expedición. La metodología aplicada permitió una caracterización precisa de los colores, mejorando las descripciones de color previas mediante Munsell Color **realizado a bordo**, durante la propia Expedición. La caracterización del color se ejecutó en imágenes digitales de alta resolución aplicando un método basado en el ajuste, incluidos niveles, brillo y vibración - seguido de la medición de píxeles. La relación propuesta entre las características de color / sedimentología / tipo de sedimento, debe considerarse con cierta precaución. El análisis tecnológico revela la influencia de las huellas fósiles en las variaciones de color en el sedimento, independientemente del tamaño de las huellas y la cantidad de bioturbación, siendo el material de relleno de las huellas fósiles el factor más determinante. Por lo tanto, las superficies bioturbadas inferiores (6%) por pequeños fósiles (Conditas) muestran una mayor influencia en las variaciones de color que las superficies bioturbadas más altas (25%) por grandes fósiles traza (Thalassinoides), debido a que el color del material de relleno. Por lo tanto, un análisis iconológico¹⁸ detallado debe acompañar el estudio sedimentológico de los núcleos modernos de alta mar con el fin de evitar interpretaciones erróneas de los parámetros sedimentológicos involucrados. De la información litológica, esta puede presentar una gran variedad de tamaños de grano (de arcilla a grava) y composición, y pueden ser biogénicos o volcánicos, aunque es común una combinación de los anteriores. La información de color previa sobre núcleos recuperados de la Expedición 339 se obtuvo directamente a bordo durante la descripción del núcleo visual utilizando Munsell Soil Color Charts y espectrofotometría justo después de la división de núcleos. Asimismo, el procedimiento propuesto es útil para recopilar información preliminar sobre esta característica sedimentológica. Durante IODP Expedition 339, se obtuvo información preliminar de numerosos análisis a bordo de núcleos recuperados, incluidos

¹⁸ Estudio del comportamiento de las huellas de los organismos

aspectos bióticos y abióticos tales como la descripción del color central, susceptibilidad magnética o atenuación de rayos gamma. La caracterización del color es una característica altamente diagnóstica de la litología y otros atributos sedimentológicos de los sedimentos marinos. En geología marina, y especialmente en investigación de aguas profundas, el análisis del color puede conducir a una caracterización general de los sedimentos del núcleo a bordo (A. Mix & et al, 1992).

La información del color puede derivarse utilizando métodos no destructivos, que incluyen la determinación visual, la aplicación de los gráficos de colores del suelo de Munsell o el estudio de la reflectancia, la luminosidad o los valores grises. La determinación visual y la carta de colores de Munsell son técnicas cualitativas cuya precisión depende del ojo humano (W. Balsama & et al, 1999). En resumen, la metodología de tratamiento de imágenes digitales recientemente desarrollada que se muestra aquí como una herramienta muy útil para el análisis del color de núcleos modernos de alta mar de IODP Expedición 339, reveló la relación entre valores de color y características litológicas, y vislumbrando un interés potencial para caracterizar y diferenciar entre tipos de los sedimentos registrados en la Expedición. Este conocimiento adicional contribuye a uno de los objetivos principales de esta Expedición, en la caracterización de la dinámica del agua de salida del Mediterráneo. La metodología propuesta proporciona información más detallada sobre variación de color que la descripción Soil Color Munsell utilizada a bordo durante la Expedición 339.

3.6.7 Estado del arte N.º 7

(R. Viscarra & et al, 2009), en su trabajo “*Mediciones in situ del color del suelo, la composición mineral y el contenido de arcilla mediante espectroscopía vis-NIR*”. Sostiene que, en la detección del suelo proximal (PSS) utilizan espectrofotómetros infrarrojos portátiles visibles (vis-NIR: 400-2500 nm), de los que se puede medir las propiedades del suelo in situ. Los objetivos de la investigación fueron: (i) comparar los espectros de campo recolectados in situ con los espectros recolectados en el laboratorio, (ii) estimar el color del suelo y la composición mineral de los espectros, y (iii) hacer predicciones de contenido de arcilla utilizando una biblioteca espectral, el cual contiene espectros recolectados en el laboratorio.

Las estimaciones del color del suelo se derivaron de los espectros de cada perfil utilizando Munsell H V/C y CIE Lab color. Estos fueron comparados con estimaciones cualitativas del color Munsell hecho en el campo. Las estimaciones espectroscópicas del color del suelo estuvieron de acuerdo con las estimaciones del libro Munsell, aunque las estimaciones vis-NIR tendieron a ser algo más oscuras y más amarillas. Se obtuvieron estimaciones cuantitativas de la composición mineral mediante la comparación de los espectros del suelo con los espectros de los minerales puros. La caracterización de la composición mineral del suelo por vis-NIR fue efectiva, con un buen acuerdo entre los resultados de este método y el análisis de XRD. La técnica vis-NIR fue menos laboriosa que la XRD convencional, no requirió preparación de muestras. Se usó la biblioteca espectral que contenía 1287 espectros recolectados en laboratorio y 74 espectros recolectados in situ en condiciones de campo para desarrollar modelos de regresión de mínimos cuadrados. De la espectroscopía se sabe que es la ciencia relacionada con la medición de los espectros producidos cuando los materiales

interactúan o emiten radiación electromagnética. En los años setenta y ochenta también las ciencias naturales, en especial la mineralogía, comenzaron sistemáticamente a medir las propiedades ópticas de los minerales y rocas con espectrómetros. En la última década, la espectroscopia ha dado el paso de las observaciones cualitativas de las clases de minerales, el tipo de suelo y la biomasa de vegetación a las estimaciones cuantitativas de la química de los minerales, el suelo y la vegetación. Los estudios empíricos de minerales como componentes del suelo o roca derivados del análisis de regresión de espectros contra la química son importantes para comprender la física de la interacción de la radiación electromagnética.

3.7 Marco epistemológico

Del método científico, se puede decir que es un estudio sistematizado, controlado y experimental que critica una o varias proposiciones hipotéticas acerca de ciertos fenómenos naturales y su relación. Es decir, es un procedimiento que se aplica en una determinada ciencia y la cual inicia con la observación. Mientras que, la epistemología es una rama que rodea a la teoría del conocimiento, es decir busca definir el saber a través de conceptos, fuentes y nuevos conocimientos que buscan relacionar de manera exacta entre lo que se conoce y el objeto a investigar (E. Hurtado & F. Rivera, 2006).

Tabla 3-9: Relación entre el método científico y epistemológico

Método científico	Epistemología
<ul style="list-style-type: none">• Estudia el método científico• Analiza un método• Construye métodos científicos	<ul style="list-style-type: none">• Estudia el conocimiento científico• Analiza un concepto• Construye términos teóricos

Fuente: (E. Hurtado & F. Rivera, 2006).

De los estados del arte, se tomaron los conceptos, conocimientos y métodos para cuantificar la relación de la propiedad del color de los minerales, sea en rocas o suelos, con la información que puede obtenerse sobre una ocurrencia o un estado del material que se estudia. Asimismo, reconocen que aún existe vacíos, debido a la falta de investigación, porque este concepto pertenece al campo de la física, fisiología y psicología. Por lo que, para muchos científicos puede esto sólo ser algo subjetivo. No obstante, a través de las investigaciones realizadas por expertos que se desempeñan en actividades de geología, agricultura, cerámica, suelos demuestran que existe correlaciones entre el color y la información que este puede brindar. **Asimismo, más de uno de ellos aseguran que lo más importante es saber el propósito de estudio y de cómo el color puede ayudarnos a entenderlo.**

Por ejemplo, cuando (N. Wells, 2001) hace la reflexión sobre una roca sedimentaria de color rojo y éste se pregunta por qué tomo ese color. Sin embargo, las respuestas pueden ser tan diversas, en el campo de la geología, que podría ser debido a la meteorización, diagénesis tardía o temprana, durante una deposición o porque desde el inicio ya era rojo. Es decir, la interpretación geológica se hace más compleja. Pero, no por eso, el color medido por la notación de Munsell deja de mostrarnos su información a través de sus tres parámetros (matiz, valor y croma). Sin embargo, estos pueden estar sujetos a un error de observación, incluido el daltonismo, influenciados por cambios en la iluminación, humedad de la muestra, gráficos de colores sucios o descoloridos, etc. Por lo que, para varios autores, sostienen que el color brinda una gran información, pero esta debería ser medida por un espectrómetro, para que las mediciones concuerden con los colores de Munsell logrando que sean más precisas y exactas. No obstante, estas mediciones estarán sujetas a problemas de instrumentación como la calibración, la sensibilidad a la longitud de onda diferencial, lentes sucias y otros.

Cabe resaltar, que la aplicación de la medición del color y su relación mineralógica no está enfocada a una sola ciencia, ya que en la cerámica hacen la relación de los tonos de rojo cuando se mezcla la hematita y el óxido de calcio (CaO) a diferentes temperaturas. En suelos, el cambio de color por la presencia de pirita hace que el color marrón amarillento marca el comienzo del horizonte sulfúrico en respuesta a la formación de minerales de Fe del mineral de schwertmannita. Asimismo, cuando una parte de este horizonte alcanza un pH de 2, el mineral de jarosita indica un nuevo horizonte amarillo. Asimismo, en el estudio de rocas sedimentarias, en un afloramiento de un color pálido oscuro se realizó su correlación con el contenido de Al_2O_3 con las variaciones de la escala de grises. De igual manera, en una investigación de una roca del triásico tardío para su análisis ciclo estratigráfico se recurrió a las variaciones del color de estas rocas, ya que

presentaban colores entre rojo y verde, los cuales se relacionaban con el contenido de Fe^{3+} y Fe^{2+} .

Por lo tanto, hay mucha razón en creer que es más importante saber el propósito de estudio y ver como el color puede ayudar a comprender dicho propósito. En base a los trabajos realizados podemos decir que nuestro objeto de estudio (minerales provenientes de labores de Cateo Libre) puede relacionarse con el color, pues al ser extraído de una manera selectiva, éste mantendrá el color de los minerales de interés sin diluirse con otros que no tengan valor.

3.8 Análisis comparativo de las teorías con la condición de investigación

Del estado del arte, la mayoría hacen referencia y uso a las tablas de Munsell como herramienta de cuantificación de color y su correlación ante fenómenos que se está evaluando.

Nuestro objeto de estudio, los minerales provenientes de las labores de Cateo Libre que ingresan a la planta de procesamiento de la compañía, a comparación, de los objetos de estudio que se realizaron en el estado del arte, los materiales son y estuvieron estáticos en su lugar de origen, es decir en ninguno de los casos el investigador (es) trataron de mezclar las muestras a medir. Mientras que, el mineral de cateo libre es una muestra que en un inicio estuvo estático en la naturaleza y que por medios de extracción minera se obtuvo, a lo que se considera, mineral, ya que tiene que tener una cierta ley o contenido de oro que haga que sea económico su procesamiento, por lo que su condición es dinámica.

Hasta este momento, según las investigaciones, la propiedad del color nos indica algo y lo que se debe determinar es como correlacionarlo con una variable, para que después al sólo ver el color en el campo o In Situ se pueda tomar una decisión. Para nuestro estudio, se cuenta con la paragénesis del yacimiento, *Figura N° 3-16*, el cual me indica los minerales presentes en la zona de estudio y de los cuales se tendrá que evaluar si existe alguna correlación.

Muchos investigadores sustentan cierta desconfianza a la medición del color, debido a su aparente subjetividad, pero para nuestro caso se realizó tomándose en cuenta la norma internacional ASTM para medir el color. Ver *3.5.2.3 Medición del color*.

Según el estado del arte, esta herramienta puede darnos información de manera económica, confiable y sobre todo ser un ensayo no destructivo para la muestra a analizar en el campo o In situ en tiempo real.

3.9 Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación

En los siguientes párrafos se desarrollará el análisis de todas las teorías y estados del arte que fundamenten la presente tesis. En primer lugar, definiremos al mineral como una mezcla heterogénea, la cual está dispuesta por los diferentes minerales específicos o compuestos químicos, ya que cada uno de ellos es una combinación de elementos y tienen una propiedad física, química definida. Estos compuestos de mineral están en la paragénesis del yacimiento (Ver *Figura N° 3-16*).

Figura N° 3-15: Clasificación de la materia

Fuente: modificado (Pauling, 1967)

Por lo tanto, cuando se mencione mineral, entiéndase como una mezcla heterogénea de compuestos minerales definidos, que del conjunto, tiene un mineral o elemento específico que tiene valor económico. Del marco 3.3.2 *Geología Local*, las siguientes evidencias busca corroborar y observar desde donde se extrae el mineral de las labores de cateo libre hasta el muestreo de mineral en la planta de beneficio.

Figura N° 3-16: Vista de una labor de cateo libre, Pataz

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se observó un contacto litológico del batolito de Pataz, conformada por roca diorita, con una roca antigua de la formación Contaya.

Figura N° 3-17: Contacto litológico

Fuente: Elaboración propia

Otras zonas de donde se extrae el mineral son del complejo marañón, en los que se observaron vetas de sulfuros con alteración argílica generalizada, la cual comprende principalmente de cuarzo y mica (arcilla illita) (W. Witt et al, 2016).

Figura N° 3-18: Vista de labores, zona Santa Filomena

Fuente: Elaboración propia

Las vetas son de sulfuro masivo mineralizada primordialmente por pirita, arsenopirita, marcasita, esfalerita negra, galena y trazas de calcopirita (W. Witt et al, 2016).

Figura N° 3-19: Vista de vetas en zonas de Santa Filomena

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes imágenes se observará la extracción de mineral de los mineros de las labores de cateo libre. El método de extracción utilizado es el corte y relleno. Asimismo, el acarreo del mineral se realiza por carros mineros tipo Z-20 o U-45.

Figura N° 3-20: Acarreo de mineral de labores de cateo libre

Fuente: Elaboración propia

La potencia de la veta en estas labores es por lo general menores a 50 cm, por lo que se recurre a un método de explotación selectivo. Es decir, se requiere una primera voladura para extraer el material estéril o desmonte y luego, una segunda, para el mineral valioso. El material estéril es acumulado en una Desmontera aprobada, previamente, por una autorización de inicio de actividades de explotación para minería artesanal. El mineral extraído es acumulado y clasificado en diferentes calidades antes de enviarlo a la planta de beneficio, como se atestigua en los siguientes Figuras.

Figura N° 3-21: Clasificación de mineral por calidad

Fuente: Elaboración propia

El mineral clasificado es acumulado para ser programado por el área de Acopio, quien lo envía a la planta de beneficio de la compañía para su procesamiento.

Figura N° 3-22: Acumulación de mineral

Fuente: Elaboración propia

Otros mineros artesanales optan por acumular el mineral en tolvas para ser enviadas a su procesamiento. La apariencia de los minerales en las tolvas es variada, ya que dependerá del lugar de extracción.

Figura N° 3-23: Mineral en tolvas

Fuente: Elaboración propia

De la labor del *Figura N° 3-16*, se obtuvieron los siguientes minerales de los fueron enviados a su procesamiento metalúrgico. Este mineral, como se mencionó, es producto de una zona de contacto litológico entre un Intrusivo y un Metamórfico.

Figura N° 3-24: mineral proveniente de la zona de contacto litológico

Fuente: Elaboración propia

En el ámbito mineralógico, el mineral aurífero de Pataz se caracteriza por su alto contenido de sulfuros metálicos, aproximadamente de 10 a 50% en volumen. Las vetas presentan una secuencia de mineral de dos etapas con la precipitación de pirita, arsenopirita y cuarzo lechoso, seguido de los metales cinc, plomo, cobre, antimonio y otros minerales portadores de oro. (Y. Haeberlin et al, 2004). En la siguiente imagen se observa la presencia del mineral de cinc, la esfalerita, rodeada de pirita y material metamórfico

Figura N° 3-25: Mineralogía del mineral extraído

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se observa la presencia de arsenopirita en el mineral aurífero.

Figura N° 3-26: Mineralogía - presencia de arsenopirita

Fuente: Elaboración propia

De la labor antigua de la zona de Santa Filomena (Ver *Figura N° 3-18*), (W. Witt et al, 2016) sostienen que la mineralización está emplazada en el complejo Marañón, el cual es caracterizado por una alteración de mica blanca intensa y penetrante, excepto a los alrededores de las vetas de cuarzo, pirita, arsenopirita, marcasita, clorita y pirrotita deformada, la cual está asociada a la biotita. Asimismo, si tenemos en cuenta este periodo de mineralización (Santa Filomena) es después de la mineralización del Batolito de Pataz (Ver *Figura N° 3-9*).

Figura N° 3-27: Mineralogía de la zona de Santa Filomena

Fuente: Elaboración propia

De la evidencia mostrada se puede observar que los trabajos realizados en el Batolito de Pataz sobre la geología son muy descriptivas y reales, ya que estos pudieron comprobarse en campo. Por lo que, se comprobó que los minerales de la secuencia paragenética que se menciona en el *Figura N° 3-16* se presentan en el campo.

Tabla 3-10: Minerales presentes en la paragénesis

Mineral	Pirita	Arsenopirita	Esfalerita	Galenita	Calcopirita	Pirrotita	Freibergita	Electrum	Or	Jamesonita
Formula	FeS ₂	FeAsS	ZnS	PbS	CuFeS ₂	Fe _{1-x} S _(x=0-0.17)	(Ag,Cu,Fe,Zn) ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃	Ag, Au	Au	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄

Fuente: Handbook of Mineralogy

Asimismo, la variedad de la litología en el Batolito de Pataz es muy marcada, ya que se puede observar en campo (*Figura N° 3-17*). Además, en función a las *Figura N° 3-10* y *Figura N° 3-11*, las rocas observadas en campo tiene características de ser una roca de intermedia a ácida [$> \approx 52\% \text{ SiO}_2$].

Por otro lado, durante la extracción del mineral hasta su envío, el minero artesanal de la labor de Cateo Libre trata de ser lo más selectivo posible tratando de no generar dilución de mineral, ya que al incurrir en esto no será beneficioso para él, pues si no supera la ley de corte (7g Au/ton), por acuerdo entre la compañía y el minero, no se le retribuirá. Aunque, esto dependerá mucho de la experiencia y destreza del minero en no tratar de diluir.

En el apartado, 3.5.1.5 *Dilución de mineral*, se mencionó que este término es una invención del hombre, porque en la naturaleza no existe, porque ella no diluye el mineral. Es así como, en minería, el significado de la dilución y la recuperación del mineral están representados por dos partes: el hombre y la naturaleza. Ambos son guiados por reglas, pero la naturaleza tiene muchas reglas axiomáticas que son incorruptibles. Por lo que, el término de la dilución se atribuye al hombre y se basa en un concepto aplicado en las labores mineras. En donde se procura controlar: el error humano; el juicio minero deficiente a la caracterización de minerales pobres; la pobre tecnología implementada, debido a la falta de inversión; y la falta de enfoque integral en el negocio minero visto económicamente.

Para nuestra investigación, se contó con información de la entrega de mineral de las labores de cateo libre desde enero del 2012 hasta mayo del 2017, donde se generó un *Figura* del porcentaje de la cantidad de mineral de mala calidad extraído, con leyes de oro menor a 7 g/ton, en ese periodo de tiempo.

Figura N° 3-28: Porcentaje de entrega de mineral con baja ley

Fuente: Poderosa, Elaboración: propia

Obteniéndose una disminución de año a año, por lo que se puede decir es que han mejorado en obtener mineral de mejor calidad con leyes mayores a la ley de corte (7 g Au/ton). Esto se podría interpretar de que su dilución ha ido disminuyendo en el tiempo, pero aún sigue presentándose. Es decir, se sigue entregando mineral que no supera la ley de corte, lo cual deja de ser económico.

En el apartado de «Muestreo y Representatividad», antes de aplicarlo en nuestra investigación. Primero, se debió entender que estos minerales están sujetos a una pre clasificación, en algunos casos, que realizan los mineros artesanales de las labores de Cateo Libre (*Figura N° 3-21* y *Figura N° 3-22*) con el fin de que cada entrega de mineral tenga una mejor ley o contenido de oro. La operación de muestreo para nuestra evaluación se realizará en un cuarteador automático “Muestreo Acopio” que se encuentra después del chancado secundario y antes del ingreso a las tolvas, la cual es un paso previo para su procesamiento. (Ver *Figura N° 3-8: Diagrama de flujo de planta Marañón*). El producto del chancado secundario es de una granulometría menor de 3/8” en un 98% aproximadamente. El mineral colectado es cuarteado en rifles tipo Jones obteniéndose muestras representativas para sus posteriores pruebas y análisis.

Hasta la etapa de muestreo del mineral proveniente de las labores de Cateo Libre, se tiene todos estos datos que no se puede controlar. Sin embargo, es aquí donde la teoría de la geología, mineralogía, minería, metalurgia y la clasificación de la materia se unen para clasificar y caracterizar estos minerales que causan los problemas que se sustentaron en 1.2 Descripción de la problemática y así lograr una gestión de estos minerales. Del 3.2 Marco organizacional de la compañía, partimos de la gestión estratégica, la cual ayuda a obtener una alta rentabilidad. El presente trabajo de investigación tiene como objeto de estudio a los minerales que proviene de labores de Cateo Libre, las cuales están dentro de las zonas de concesiones que Compañía Minera Poderosa S.A. tiene y las que representan en tonelaje el 25% y en onzas finas de oro el 40% del total de la organización respectivamente. Pero, de estos minerales extraídos y procesados, su recuperación metalúrgica no supera el 90%, por lo que se requiere caracterizarlos antes de su procesamiento y así maximizar la cantidad de oro fino. Puesto que, cada mineral de cada labor proviene de diferentes zonas, las cuales tiene una cierta mineralogía, una ley promedio y una cierta recuperación metalúrgica.

Para maximizar lo anterior, partiremos de la esencia del negocio minero.

La utilidad se puede definir como la diferencia entre las ventas menos los costos.

$$Utilidad = Ventas - Costos$$

En términos mineros, la ecuación anterior se puede interpretar de la siguiente manera.

Donde, las ventas sería las onzas de oro producidas por el precio internacional menos las onzas procesadas por el costo de procesamiento y asociados.

$$Utilidad = OnzAu_{Producido} \times Precio\ de\ Au - OnzAu_{procesado} \times Costos_{(Procesam+Asociado)}$$

De esto, una variable independiente es **precio internacional**, que por medio de la London Bullion Market Association (LBMA), las cinco casas comercializadoras de oro más

grandes del mundo conciertan el precio, según sea la oferta y demanda del día. Por lo que, esta variable no es controlada.

Otra variable, son los **costos de producción y asociados**, los cuales se pueden expresar en [USD \$/ Onz Au]. Estos costos tienen una relación directa con la cantidad total de mineral que se procesa. Además, esto es sin contar con otros costos fuera de los asociados. Asimismo, la variable de **onzas de oro producidas**, las cuales depende de las onzas de oro procesadas o tratadas. Esto es, porque estas onzas son las que se venden en condiciones de producto terminado.

Y la última variable, las **onzas de oro tratadas o procesada, la cual** dependerá de la **ley** (en onzas de oro por tonelada métrica), del **tonelaje tratado** (en toneladas métricas) y la **recuperación metalúrgica** (en %), por lo que el producto de estas tres variables será lo que se quiera maximizar.

$$Onz Au_{procesada} = Ley Au \times Tonelaje \times \%Recup Met$$

$$Onz Au_{procesada} = \left[\frac{Onz Au}{Ton} \right] \times [Ton] \times [\%]$$

De la ecuación anterior, debemos tener en cuenta si los términos dependen de la cantidad de materia o no. Así pues, el tonelaje (ton) es una propiedad extensiva, es decir depende de la cantidad de material sin importar la procedencia. Por el contrario, la ley de mineral (onz/ton) no depende de la cantidad de materia, es decir a mayor cantidad de material o tonelaje con cierta ley de oro, esta ley no aumentará. El mismo razonamiento ocurre con la recuperación metalúrgica. Tanto la ley de mineral como la recuperación metalúrgica depende de muchos factores como la mineralogía y otros, los cuales a su vez depende de la génesis del yacimiento mineral y de sus eventos geológicos. Puesto que, en donde nos encontramos es un yacimiento de tipo orogénico y por ende tanto la mineralogía y la litología son cambiantes por ser rocas muy antiguas. Esto se puede ver en los acápites

3.3.2.3 Mineralización, 3.3.3 Yacimiento de Mineral, 3.3.4 Mineralogía y 3.3.5 Procesamiento del oro.

Por lo tanto, para lograr caracterizar y luego clasificar los minerales que provienen de estas labores, deberá tenerse en cuenta que, en primer lugar, es una mezcla heterogénea de minerales (*Figura N° 3-15*). De este conjunto, el mineral valioso es el oro. Sin embargo, existe en gran cantidad del elemento plata, el cual también es un mineral valioso, pero no tan económico como el oro, para este contexto. Del *Figura N° 3-14: Diagrama ternario de Au-Ag-Cu*, se observa que tanto el término de oro nativo y electrum son inestables porque no están definidos en cantidades exactas sino en un rango de proporciones entre estos elementos. Para nuestro trabajo, se buscó una relación entre las leyes de oro y plata de las muestras de cabeza de mineral recibidas en la planta de beneficio en el mes de abril del 2017. En donde se obtuvo las siguientes relaciones:

Relación de Oro mayor que la Plata

Tabla 3-11: Relación de Au/Ag mayor a 1

Código	1015235	1015009	1015236	1015234	1015159	1023234	1015158
Ley Au (g/t)	143.22	142.37	120.10	105.94	84.83	79.41	51.68
Ley Ag (g/t)	47.60	85.06	46.80	50.60	41.28	30.73	22.24
Relación Au/Ag	3.01	1.67	2.57	2.09	2.05	2.58	2.32

Fuente: Poderosa, Elaboración: propia

Figura N° 3-29: Relación de Au/Ag mayor a 1

Fuente: Poderosa, Elaboración: propia

Relación de Oro menor que la Plata

Tabla 3-12: Relación de Au/Ag menor a 1

Código	1015197	1015207	1015228	1015233	1015307	1015120	1015218
Ley Au (g/t)	65.20	69.30	60.08	57.02	77.94	95.20	87.95
Ley Ag (g/t)	501.90	412.50	402.75	285.36	250.85	220.80	177.87
Relación Au/Ag	0.13	0.17	0.15	0.20	0.31	0.43	0.49

Fuente: Poderosa, Elaboración: propia

Figura N° 3-30: Relación de Au/Ag menor a 1

Fuente: Poderosa, Elaboración: propia

Es decir, los minerales auríferos que provienen de estas labores tienen diferentes calidades, en términos mineralógicos. Del siguiente Figura, el lado izquierdo tiene una relación Au/Ag de 3 y el de la derecha una relación Au/Ag de 0.13 o Ag/Au de 7.7.

Figura N° 3-31: Minerales de la relación de Au/Ag

Fuente: Elaboración propia

También, existe el llamado oro refractario (ver *Figura N° 3-15: Tipos de asociaciones del oro con sulfuros*) el cual fue definido en el apartado 3.3.5 *Procesamiento del oro* en donde por medio de la *Figura N° 3-17 Tipo de oro según granulometría*, se observa que este oro es de tamaño sub microscópico bordeando el rango entre [0.1 a 10] μm . Haciendo que la recuperación metalúrgica del mineral a procesar disminuya. Por lo que, para cuantificar esta refractariedad, Compañía Minera Poderosa en octubre del 2017 mando a realizar un análisis mineralógico mediante microscopio electrónico de barrido con el programa TIMA en Chile. El método fue por análisis de fases brillantes. El compósito a analizar fue del mes de mayo del 2017 de Acopio, constituido por minerales de labores de Cateo Libre. En donde, el análisis de oro y electrum se realizó la separación según el contenido de plata como:

Gold	Oro con Plata hasta 10%
Gold + Ag	Oro con Plata hasta 20%
Electrum + Ag	Oro con Plata hasta 30%
Electrum + + Ag	Oro con Plata hasta 40%
Electrum + + + Ag	Oro con Plata hasta 50%
Silver + Au	Ag > Au

Se considero que el Electrum con más de 35 a 40 % de plata se va haciendo refractario

Figura N° 3-32: Fases brillantes de mineral

Fuente: CIA Poderosa (2017)

Del Figura, lado izquierdo, con una escala gráfica 50 μm se observa la muestra a analizar que contiene minerales como arsenopirita, calcopirita, cuarzo, esfalerita, pirita. A los que se realizará el análisis de fases brillantes. Tener en cuenta que en el apartado de “Molienda y Concentración Gravimétrica” del apartado 3.4.1.1 *Planta de Beneficio Marañón*, el producto de la molienda primaria tiene un pasante menor a la malla 200, 74 μm , en un 48% y en la molienda secundaria en un 98% de la misma malla. La imagen de la derecha hace referencia a los elementos químicos distribuidos en la muestra de mineral a analizar. En donde se puede apreciar el comportamiento de cada elemento químico en esa superficie. En donde se observa al oro (Au) en pequeños puntos encima de los minerales de calcopirita, esfalerita y pirita. Asimismo, se observa pequeñas acumulaciones del elemento haciendo que la imagen sea más nítida, observándose estas 2 ocurrencias del oro, de esto lo que más existe son estas micropartículas encima de los minerales mencionados. Del mismo modo, se puede apreciar la ocurrencia de los demás elementos químicos.

Es así como, teniendo en cuenta el tamaño de la escala gráfica (50 μm), la presencia de las micro partículas es menor a las 10 μm , lo cual según la investigación realizada y presentada en el *Figura N° 3-17 Tipo de oro según granulometría*, se cumple que el oro está en el rango refractario.

La conclusión del análisis mineralógico del laboratorio sostiene que las fases mineralógicas “Electrum + + + Ag” y “Silver + Au” representan en promedio un 43.33% de Oro refractario del promedio del compósito generado por el mes de mayo del 2017, del cual aseguran que puede ser recuperado, pero probablemente se tenga un relave más alto del promedio. Asimismo, afirman la presencia de sulfuros de Fe, Zn, Cu, As, Pb y en menor cantidad de Sb. También, informan que los granos de oro y plata tienen tamaños

menores a 10 μm y que las partículas que los contienen predominan en un 65% en peso, las que tienen un tamaño comprendido entre los 3.5 μm a 49 μm .

Por lo tanto, teniendo en cuenta todo lo anterior, querer caracterizar estos minerales por separado sería complicado, ya que cada mineral tiene su particularidad, ver *Anexo N° 3* y además que estos estén sujetos a cambio geológicos en el tiempo hace que esta labor sea más compleja. Por lo que, debemos regresar al primer párrafo de este acápite en donde mencionamos que estos minerales deben considerarse como una mezcla heterogénea comprendida por diferentes compuestos minerales con características física y químicas definidas.

De los estados del arte descritos anteriormente, se hace mención de la propiedad del color, el cual pertenece a los campos de la física, fisiológica y psicología, en donde esta nos ayuda a obtener información de un material mediante el uso de un nombre estandarizado del color. En el que, absolutamente todos hacen referencia a las tablas de colores de Munsell. Sus aplicaciones son muy versátiles, los cuales van desde la cerámica, fabricación de acero, en geología marina, caracterización de rocas sedimentarias y estudios de suelo y evolución. Estas tablas se basan en tres parámetros que Munsell lo trabajo y que son: tono, valor y croma. (Ver 3.5.2.2 *Sistema de color* Munsell). De estos, valores y teniendo en cuenta la definición del color de mineral vistos en 3.5.2.4 *Color de mineral*, el cual hace referencia a la cristalización de los minerales, los cuales darán cierta tonalidad al mineral formado. Asimismo, en el acápite de 3.3.6 *Muestreo y representatividad*, se mencionó sobre el tamaño de partícula y su representatividad. En la teoría del Color (Palet, 2002), los factores físicos que dan la formación del color y las tonalidades destacan la cristalinidad y el tamaño de la partícula.

En conclusión, esta investigación se basará en un triada compuesta por el mineral, muestra y color, las cuales interaccionan generando información. En donde, la primera, estará

influenciada por su mineralogía y su procedencia; la segunda, está sujeta por la dilución de mineral y su granulometría o tamaño de partícula al momento de analizarlo por su color, ya que este depende del tamaño; y, por último, el color dependerá de los anteriores y me brindará información al instante. Es decir, por medio del color se podrá inferir sobre el comportamiento metalúrgico in situ, al momento, para que se tome una decisión de cómo ha de procesar este mineral, ya que como se sustentó, líneas arriba, no sólo es la mezcla de minerales y elementos químicos que se tiene, sino que además por la refractariedad que tiene nuestro elemento de interés, el oro.

Figura N° 3-33: Mineral, muestra y color

Fuente: Elaboración propia

Esta solución responde a la problemática planteada, puesto que los resultados oficiales de los minerales de labores de cateo libre, sea leyes de cabeza y recuperación metalúrgica es proporcionada en un tiempo mínimo de 3 días, por lo que para ese tiempo el mineral ya fue procesado junto con otros minerales de diferentes características y está en el relave.

Es por esto, que cada zona de extracción de las labores de cateo libre que los mineros artesanales proveen a la compañía tendrá su respectiva ley y recuperación metalúrgica promedio. Además, de su mineralogía, es decir si es óxido o sulfuro.

Retomando la ecuación a maximizar se tendrá que enviar a la planta de beneficio, un cierto tonelaje de mineral con una ley y recuperación metalúrgica promedio con el fin de obtener la máxima cantidad de onzas de oro. Asimismo, teniéndose en cuenta la mineralogía.

$$Onz Au_{procesada} = \sum_{i=0}^n Onz Au_i = \sum_{i=0}^n Ley Au_i \times Ton_i \times \% Recup. Met._i$$

Donde: i = zonas de extracción

Por lo tanto, el modelo de solución tendrá una función objetivo, en la que buscará maximizar la cantidad de onzas de oro por todas zonas de extracción.

$$Maximar \sum_{i=0}^n Onz Au_i \quad \text{óxido} + \sum_{i=0}^n Onz Au_i \quad \text{sulfuro}$$

El cual estará sujeto al tipo de mineral, sea óxido o sulfuro:

$$Ton_i \leq a_i$$

El tonelaje de cada zona

$$Ley Au_i \leq b_i$$

Ley de oro promedio de cada zona

$$\% Recup. Met._i \leq c_i$$

% Recup. Met. promedio de cada zona

De la función objetivo y del tipo de mineral, se obtiene una matriz como se muestra en la siguiente tabla, en donde se tiene en cuenta que en cada zona de extracción hay mineral de tipo óxido y sulfuro, dependiendo el grado de color de cada uno de ellos, estos presentarán diferentes comportamientos de ley y de recuperación metalúrgica promedio.

Por lo que, la siguiente matriz que sigue la función objetivo y el tipo de mineral, responderá a los tonelajes, leyes promedio y recuperación metalúrgica promedio de cada zona de impacto respecto a la clasificación de color basado en el uso de las Tablas Munsell de roca.

Tabla 3-13: Matriz de solución de minerales

Zonas de impacto	Óxido				Sulfuro				Total, general
	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	
Zona 1	Z ₁ O ₊	Z ₁ O ₊₊	Z ₁ O ₊₊₊	Z ₁ O ₊₊₊₊	Z ₁ S ₊	Z ₁ S ₊₊	Z ₁ S ₊₊₊	Z ₁ S ₊₊₊₊	Z ₁ Total
Zona 2	Z ₂ O ₊	Z ₂ O ₊₊	Z ₂ O ₊₊₊	Z ₂ O ₊₊₊₊	Z ₂ S ₊	Z ₂ S ₊₊	Z ₂ S ₊₊₊	Z ₂ S ₊₊₊₊	Z ₂ Total
Zona 3	Z ₃ O ₊	Z ₃ O ₊₊	Z ₃ O ₊₊₊	Z ₃ O ₊₊₊₊	Z ₃ S ₊	Z ₃ S ₊₊	Z ₃ S ₊₊₊	Z ₃ S ₊₊₊₊	Z ₃ Total
Zona 4	Z ₄ O ₊	Z ₄ O ₊₊	Z ₄ O ₊₊₊	Z ₄ O ₊₊₊₊	Z ₄ S ₊	Z ₄ S ₊₊	Z ₄ S ₊₊₊	Z ₄ S ₊₊₊₊	Z ₄ Total
Zona 5	Z ₅ O ₊	Z ₅ O ₊₊	Z ₅ O ₊₊₊	Z ₅ O ₊₊₊₊	Z ₅ S ₊	Z ₅ S ₊₊	Z ₅ S ₊₊₊	Z ₅ S ₊₊₊₊	Z ₅ Total
Zona 6	Z ₆ O ₊	Z ₆ O ₊₊	Z ₆ O ₊₊₊	Z ₆ O ₊₊₊₊	Z ₆ S ₊	Z ₆ S ₊₊	Z ₆ S ₊₊₊	Z ₆ S ₊₊₊₊	Z ₆ Total
Zona 7	Z ₇ O ₊	Z ₇ O ₊₊	Z ₇ O ₊₊₊	Z ₇ O ₊₊₊₊	Z ₇ S ₊	Z ₇ S ₊₊	Z ₇ S ₊₊₊	Z ₇ S ₊₊₊₊	Z ₇ Total
Total, general									

Fuente: Elaboración propia

Para esta investigación se utilizó la nomenclatura según la categoría por tipo de mineral, óxido o sulfuro, más un signo “+”, el cual indica el aumento en la intensidad del color.

Asimismo, cada sub categoría tiene su respectiva notación de color Munsell.

Tabla 3-14: Notación Munsell por sub categorías

Categoría	Notación Munsell
Óxido +	H ₁ V ₁ /C ₁
Óxido ++	H ₂ V ₂ /C ₂
Óxido +++	H ₃ V ₃ /C ₃
Óxido ++++	H ₄ V ₄ /C ₄
Sulfuro +	H ₅ V ₅ /C ₅
Sulfuro ++	H ₆ V ₆ /C ₆
Sulfuro +++	H ₇ V ₇ /C ₇
Sulfuro ++++	H ₈ V ₈ /C ₈

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

METODOLOGIA Y RESULTADOS

4.1 Análisis de las muestras de investigación

4.1.1 Obtención de muestras para la investigación

Las muestras para el presente estudio son los relaves de los minerales que provienen de las labores de cateo libre, las cuales fueron sometidas a cianuración directa para determinar recuperación metalúrgica, leyes de cabeza y ley del relave. Dichas muestras fueron facilitadas por el superintendente de planta de la compañía. Se tomó como muestra 392 muestras recibidas durante el mes de abril del año 2017. Entre estas muestras se encontraron minerales de tipo óxidos y sulfuros. En la que, cada muestra corresponde a un volquete con mineral. Asimismo, se facilitaron dieciséis (16) muestras sin realizar el proceso de cianuración, pues pertenecieron a los análisis de mallas valoradas, debido a que contenían altos valores de oro. (Ver *Figura N° 3-31*).

Figura N° 4-34: Muestras para la investigación

Fuente: Elaboración propia

Las muestras de relave presentaban una granulometría menor a 74 μm , malla menos 200M, y las muestras de mallas valoradas un tamaño menor a los 3/8", tamaño del producto del chancado secundario. En el *ANEXO 1* se observa las 392 muestras que van a ser utilizadas para la presente investigación.

Asimismo, de cada muestra recibida, que pesaba aproximadamente 500 gramos, se le realizó un debido cuarteo hasta obtener una muestra representativa de 100 gramos de cada una. El motivo fue para colocarlos de una manera tal que se pueda observar y comparar sus propiedades físicas, que en nuestro caso es el color.

Figura N° 4-35: Comparación de muestras de investigación

Fuente: Elaboración propia

Al final de la experimentación las muestras fueron debidamente selladas y luego envasados como se muestra en el siguiente Figura.

Figura N° 4-36: Almacenamiento de muestras de investigación

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Representatividad de las muestras obtenidas

El mineral proveniente de labores de cateo libre que entregan los mineros artesanales es recibido en la planta de beneficio de Maran para su pesado, chancado y muestreo secuencialmente, antes de ingresar a la tolva de fino para su posterior tratamiento metalrgico, tal y como se observa en el *Figura N 3-8*. El muestreo de mineral es por cada camn entregado. El tipo de mineral es variado, pues se tiene desde xidos hasta sulfuros con diferentes intensidades de color.

Figura N 4-37: Camiones con mineral de labores de cateo libre

Fuente: Elaboracin propia

El mineral, despus ser pesado es almacenado en la tolva de gruesos, donde es triturado por una chancadora primaria de quijada hasta una granulometra pasante de 2'', pasa seguidamente por una chancadora secundaria, cnica, hasta una granulometra de 96% pasante 3/8'' (*Figura N 3-7*). El producto chancado es transportado por una faja, el cual alimenta a las tolvas de fino. Antes de ingresar a dichas tolvas es muestreado, por el cuarteador automtico, *Figura N 4-39*. El material muestreado por el cuarteador tiene una granulometra pasante de 3/8'' y este pasa por 3 cuarteadores jones, en donde se obtiene 6 productos, *Figura N 4-38*. De estos, (02) sacos de aproximadamente de 15 Kg, una es para la contra muestra de planta y la otra para laboratorio metalrgico, donde se determinar la ley de cabeza y su recuperacin metalrgica, por medio una de

cianuración en botella. También, si fuera necesario se realiza mallas valoradas para definir leyes de alta significancia. Otras (02) dos muestras son para “Dirimencia”, las cuales sirven para decidir la veracidad de una ley ante alguna no conformidad del minero artesanal. Y, por último, (01) una muestra es entregada al minero artesanal de la labor de cateo libre como contra muestra, dicha muestra tiene sólo un carácter referencial más no definitivo, puesto que para definirse que leyes se hace uso de las muestras de Dirimencia. Asimismo, la última muestra es para laboratorio químico, el cual emite una ley referencial y el porcentaje de humedad de cada mineral que ingresa a la compañía.

Figura N° 4-38: Etapas del muestreo automático

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4-39: Cuarteador automático

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Uso del sistema Munsell para clasificación de mineral

De las seis muestras recolectadas (Figura N° 4-38). La que va dirigido al laboratorio metalúrgico, es para realizar ensayos químicos y pruebas metalúrgicas con el fin de obtener la ley de cabeza y la recuperación metalúrgica de dicho mineral entregado. Es aquí, donde se obtiene los relaves, los cuales serán las muestras para realizar la presente investigación. Se trabajó con los minerales entregados en el mes de abril del 2017, en donde se realizó una clasificación por mineralogía y luego mediante el uso de las tablas Munsell (Figura N° 3-14) en la luz del día. En donde, se logró dividir en dos categorías, sulfuro y óxidos, de los cuales de cada Categoría se volvía a subdividir en 4 subcategorías en donde se clasificó según su intensidad de color. De manera esquemática se observa en el *Figura N° 4-40* y en el *Figura N° 4-41* lo que se obtuvo en realidad. Esta determinación, se realizó en función a las tablas Munsell de rocas (*Anexo N° 2*). Donde, los tres parámetros constan de: Tonalidad o matiz que es la base del color espectral o longitud de onda, Value o valor de iluminación del color y Chroma o la intensidad del color. Pues, de cada material entregado es una mezcla de minerales (3.9 *Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación*), por lo que operacionalmente es necesario clasificarlos y caracterizarlos.

Asimismo, del Geology National Engineering Handbook (2012) sostiene que el color de una roca es un atributo de la percepción visual que se puede describir por los nombres de los colores (ASTM 1986) (Ver 3.5.2.3 *Medición del color*). Donde, se hace uso de los colores del suelo de Munsell y el sistema de colores de las rocas (Munsell 2009a y 2009b). Su aplicación es para fines de registro de campo rápido, es decir, investigaciones de reconocimiento. Además, el color percibido depende en gran medida no solo de la distribución de potencia espectral del estímulo de color, sino también del tamaño, forma, estructura y envoltorio del área de estímulo. (Engineering Classification

of Rock Materials, 2012). Esto guarda relación con lo que menciona (J. Vidal, Generalidades sobre los minerales, 1984) donde dice que los colores de los minerales pueden ser propios, accidentales o movibles. (Ver 3.5.2.4 *Color de mineral*). Asimismo, las coloraciones rojizas hacen referencia a lo visto en el acápite 3.5.1.1 *Mineral oxidado* y el color oscuro a los sulfuros (Ver 3.5.1.2 *Mineral sulfurado*).

A continuación, se presenta categoría y subcategorías de clasificación de los minerales a modo conceptual por su coloración e intensidad. Asimismo, se muestra la evidencia realizada en la presente investigación, la cual será sujeta a posteriores pruebas físicas y químicas.

Figura N° 4-40: Clasificación de compósitos de mineral

Fuente: Elaboración propia

El producto de la clasificación por compósitos de las 392 muestras de relaves muestreadas y cianuradas de las labores de cato libre se presenta en la siguiente Figura:

Figura N° 4-41: Compósitos clasificados por color

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Información de las muestras de investigación

Para la presente investigación, se tuvo los datos históricos de los minerales entregados por los mineros artesanales de labores de cateo libre desde enero del 2012 hasta mayo del 2017. En donde, se determinó las zonas y subzonas de impacto mediante diagrama de Pareto. Por lo que, se encontró las zonas que más aportan en términos de tonelaje y gramos de oro producido en ese periodo. En otras palabras, saber: **“los pocos que aportan mucho”**. La compañía, tiene identificado 36 zonas de extracción de mineral. De estas zonas, se buscará cuáles son las que más han aportado a la compañía y si estas aún siguen haciéndolo en el periodo de análisis de la investigación, mes de abril del 2017. Esto es, porque se quiere ir de lo general a lo específico

Figura N° 4-42: Pareto de zonas que aportan en tonelaje

Fuente: Elaboración propia

De las 36 zonas de extracción, siete (07) zonas son las que han aportado el **92.34% en tonelaje** a la organización durante el 2012 al 2017. Estas son: la zona de **“Patatz (Genérico)”** seguido de las zonas de **“Atahualpa”, “Porfía”, “Sta María”, “Karola”, “Choloque” y “Marleny”**.

Del mismo modo, se realizó el Pareto de las zonas que más han aportado en términos de cantidad de oro recuperado a lo largo del periodo de tiempo de evaluación, con el fin de corroborar si son las mismas zonas de impacto, que en el tonelaje.

Figura N° 4-43: Pareto de zonas que aportan en oro recuperado

Fuente: Elaboración propia

Del Figura, se puede decir que las mismas siete (07) zonas descritas en el párrafo anterior han **aportado el 93.41% de cantidad del metal dorado** a la organización. Por lo que, se puede concluir que nuestro enfoque de análisis debe ser estas siete (07) zonas de extracción de mineral de cateo libre con una **probabilidad mayor al 90%**.

Además, se debe tener en cuenta que **cada zona tiene** una o varias **sub zonas** o también llamado **“Descripción de Zona”**, lo cual se requiere hacer un diagrama de Pareto de las Subzonas de cada Zona para determinar el nivel de impacto de cada una de ellas.

Procesando todo lo anterior, se realizó un cuadro resumen, el cual está en orden de aporte de cantidad oro recuperado con sus respectivas sub zonas; y además las que más aportan con su respectivo porcentaje de impacto. Es decir, por ejemplo, que la zona de “Pataz (Genérico)” tiene 20 subzonas, de las cuales cuatro (04), Pataz, Planta Santa María, Nivel 2520 y Atahualpa, en conjunto representan el 95% de aporte para dicha zona. El mismo razonamiento se aplica a las demás zonas

Tabla 4-15: zonas y zub zonas de aporte de mineral

Zona	Cantidad Subzonas	Subzonas de impacto				Impacto de Subzonas
Pataz (Genérico)	20	Pataz	Planta Santa María	Nivel 2520	Atahualpa	95.00%
Porfía	3	Planta Santa María	Nivel 2520			96.32%
Atahualpa	8	Atahualpa				97.40%
Sta María	14	Planta Santa María	Pataz	Nivel 2520		89.60%
Karola	3	Karola				99.27%
Marleny	4	Marleny	Socorro			98.87%
Choloque	4	Choloque				97.93%

Fuente: Elaboración propia

Para nuestro periodo de evaluación, mes de abril del 2017, se realizó los siguientes Figuras. Pareto en Tonelaje y Oro Recuperado.

Figura N° 4-44: Pareto del tonelaje aportado en el mes de evaluación

Fuente: Elaboración propia

Del mes de abril tenemos que las zonas de **aporte en tonelaje** son **Pataz (Genérico), Atahualpa, Sta María, Marleny, Karola y Huayos**, que en conjunto representan el **95.58% del tonelaje** que se recibió en dicho mes.

Asimismo, en el **aporte en cantidad de oro** por zona son: **Pataz (Genérico, Sta María, Atahualpa, Marleny, Huayos y Karola**, que en total representa el **96.02% de la cantidad de oro recuperado** por la compañía.

Figura N° 4-45: Pareto del oro recuperado en el mes de abril 2017

Fuente: Elaboración propia

La Zona de Pataz (Genérico) es una de las que más aporta en términos de tonelaje y cantidad de oro recuperado. Asimismo, se advierte que no se realizó Pareto de las sub zonas porque existe coincidencia de nombres de subzonas con otras zonas. Sin embargo, al analizar por zonas nos brinda una visión más holística del lugar de estudio.

De las pocas zonas que han aportan mucho a la organización en el mes de abril del 2017, mayor al 90%, tanto en tonelaje como en cantidad de oro recuperado se realiza un diagrama de cajas para visualizar la simetría de distribución de los datos; los valores atípicos; máximos y mínimos; la mediana; y, por último, los percentiles 25 y 75, los que nos ayudará a detectar el 50% de los datos de la población.

En el siguiente Figura y tabla se observa la distribución de leyes o contenido de oro, en gramos por tonelada, de las zonas de impacto en periodo de evaluación. Donde, se observa que la zona de Pataz (Genérico) es la que presenta mayor cantidad de valores atípicos. Asimismo, sí comparamos las medianas de todas las zonas de impacto, se observa que varían, lo cual no permite poder encontrar una correlación entra las zonas que aportan mineral. Ver *Tabla 4-16*.

Figura N° 4-46: Diagrama de cajas de ley de oro de zonas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-16: Comparación de leyes entre zonas de impacto

Zona de impacto	# Muestras unid	Mínimo g Au/ton	Q1 g Au/ton	Mediana g Au/ton	Q2 g Au/ton	Máximo g Au/ton
Pataz (Genérico)	284	5.02	14.99	22.95	34.15	143.22
Atahualpa	26	4.98	15.13	17.20	18.81	101.15
Sta María	21	8.65	10.84	19.00	33.52	128.90
Marleny	14	8.01	19.47	32.29	50.07	63.56
Karola	15	3.38	13.72	22.79	29.27	74.10
Huayos	10	10.15	37.50	45.21	48.14	48.92
Total de Muestras	370					

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, se realiza un diagrama de cajas (*Figura N° 4-47*) para la recuperación metalúrgica obtenida de las pruebas de cianuración directa de las muestras recibidas durante el periodo de prueba. Obteniéndose, los siguientes resultados, donde la zona de Pataz (Genérico) presenta valores de recuperación metalúrgica variables y muy bajas. Ver *Tabla 4-17*.

Figura N° 4-47: Diagrama de cajas de recup. metalúrgica de zonas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-17: Comparación de Recup. metalúrgica entre zonas

Zona de impacto	# Muestras unid	Mínimo % Rec. Met.	Q1 % Rec. Met.	Mediana % Rec. Met.	Q2 % Rec. Met.	Máximo % Rec. Met.
Pataz (Genérico)	284	48.5%	80.9%	84.0%	87.5%	92.3%
Atahualpa	26	80.8%	85.9%	87.4%	89.1%	89.5%
Sta María	21	61.4%	86.7%	88.9%	90.6%	92.3%
Marleny	14	85.6%	89.0%	90.1%	91.2%	92.3%
Karola	15	77.8%	85.0%	89.6%	90.5%	92.1%
Huayos	10	86.8%	88.2%	89.3%	89.5%	89.8%
Total de Muestras	370					

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Análisis químico por oro y plata de los compósitos

El análisis para determinar oro y plata de los compósitos generados es realizado por laboratorio químico de la compañía y utiliza el método de ensayo al fuego, debido a su exactitud. El método consiste en la fundición del mineral aurífero pesado con plomo, por medio del litargirio, sobre una copela (crisol muy poroso, de cenizas de hueso), donde se oxida el plomo y otros metales, cuyos óxidos se funden y son absorbidos por la copela porosa. Mientras que el oro y la plata permanece en la copela en forma de botón. Este botón es laminado por medio de impacto y se determina el peso de estos dos metales y, acto seguido, se trata con ácido nítrico para que se disuelva la plata y el oro quede como residuo, el cual se pesa. Al restar el peso del oro menos el peso de oro y plata obtenemos el peso de la plata. Para obtener resultados exactos se tiene en cuenta que, al copelar la aleación, oro – plata, con el plomo siempre se pierde algo del metal noble, tanto más plomo se emplee y cuanto más alta sea la temperatura a que se calienta. Además, la copela absorbe siempre pequeñas cantidades del metal noble, tanto más grandes cuanto menor es la cantidad de plomo empleado. Esta última pérdida es, sin embargo, mucho menor que la originada por el exceso de plomo. Por lo que, se debe evitar en toda copelación de oro un exceso innecesario de plomo. Asimismo, la experiencia ha enseñado que se necesita tanto más plomo para la copelación cuanto más ley se presuma que tenga el mineral aurífero. Además, al separar la plata del oro mediante ácido nítrico hay que tener en cuenta su relación entre estos dos, puesto que la reacción se hace completa al tener una aleación plata y oro que contenga tres partes de plata o más por una parte de oro. Sí por una parte de oro hay menos de tres partes de plata, la separación es incompleta. Por lo que, se agrega plata, en forma cloruro de plata, hasta que haya por cada tres partes de plata una parte de oro. A esta operación se le conoce como **cuartación o incuartación**. Al tratar con ácido nítrico una aleación de

plata y oro en forma de lámina compuesta de 2.5 a 3 partes de plata y una de oro, éste queda en forma de hojas de color pardo, y si la cantidad de plata es mayor, queda en forma de polvo fino. Por lo tanto, del método se puede obtener números exactos cuando se emplea para la copelación cantidades adecuadas de plomo y cuando existe la proporción exacta entre el oro y la plata, es decir, que es necesario conocer aproximadamente la composición de la aleación antes de practicar el análisis definitivo. (TREADWELL, 1947).

4.1.6 Pruebas de gravedad específica de los compósitos

Para la presente investigación, la determinación de la gravedad específica de cada compósito caracterizado por su color mediante el sistema Munsell para rocas es por medio del método del picnómetro.

Este método, es usado en el laboratorio metalúrgico de la compañía. Puesto que, tiene las ventajas de comodidad al realizar la prueba, ser exacto y de permitir el empleo de mineral reducidos a tamaños finos. Sin embargo, presenta una gran sensibilidad ante las burbujas atrapadas en el picnómetro y las variaciones de temperatura durante el pesado (Klockmann & Ramdohr, 1947).

El picnómetro consiste en un frasco de cristal de 20 cm³ de capacidad, con un tapón hueco, esmerilado, y prolongado en un tubo fino, lo cual permite llenar exactamente el frasco. El peso del picnómetro lleno de agua, que designaremos como “W_{pw}”; peso del picnómetro sólo como “W_p”; y, peso del picnómetro con la muestra como “W_{pm}”. Se halla el peso “W_{pm} - W_p” del mineral a determinar, la cual debe estar triturada; se introduce en el frasco, se acaba de llenar con agua y se determina el peso total “W_{test}”; el peso específico es:

$$GE = \frac{W_{pm} - W_p}{W_{pw} + W_{pm} - W_p - W_{test}}$$

Sí la muestra mineral del compuesto es soluble en agua, se empleará otro líquido como aceite, alcohol u otro de peso específico conocido.

Figura N° 4-48: Método del picnómetro

Fuente: Elaboración propia

4.1.7 Prueba de ataque ácido a los compósitos

Los minerales de oro, para su obtención implica la separación por gravedad, cianuración directa, el cual es nuestro caso, y otros métodos. Los minerales de oro refractarios no son aptos de cianuración directa, por lo que se requieren investigaciones mineralógicas detalladas para ayudar a determinar los procesos de recuperación. Hay seis factores mineralógicos que pueden contribuir a una recuperación metalúrgica. Estos son: 1: la naturaleza del mineral que contienen oro; 2. el tamaño de grano del mineral aurífero; 3. la naturaleza de los minerales de la ganga, 4. los minerales de sulfuro asociados; 5. los recubrimientos sobre el mineral aurífero; y 6. los enlaces químicos del oro u oro "invisible" (Harris, 1990).

El diagnóstico de lixiviación es una herramienta analítica que se desarrolló en Anglo American Research Laboratories, **con el fin de examinar el comportamiento del oro en el mineral**. Este proceso se lleva a cabo en muestras **muy representativas**, el cual produce resultados interpretables. El concepto de diagnóstico es simple, ya que el

mineral menos estable presente en la matriz de la muestra se elimina primero en un medio acuoso usando una lixiviación oxidativa selectiva, por medio de un ácido, después de este proceso, parte del producto oxidado es cianurado para extraer el oro liberado por la oxidación. El oro extraído de la cianuración se mide para obtener un registro del oro asociado a ese mineral. Asimismo, el residuo de esta primera etapa se puede someter a una lixiviación ácida más oxidativa y el proceso se repite (Lorenzen & Tumilty, 1992).

Por lo tanto, el objetivo del diagnóstico de lixiviación es que el metalurgista, al tener un registro casi completo del **comportamiento del oro** en la muestra, puede usarlo para diseñar los flujos metalúrgicos, entender y resolver problemas que ocurren en una planta existente o evaluar el efecto de varios reactivos en el desempeño de dicha planta. Cabe precisar, que el Diagnóstico de Lixiviación de minerales no es para su aplicación industrial sino para evaluar su comportamiento.

Para el presente trabajo de investigación, por tener poca cantidad de muestra se realizó un diagnóstico cualitativo, pues sólo se analizó con dos ácidos fuertes, el primero ácido nítrico (HNO_3) concentrado (grado técnico), y agua regia ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$) concentrados (grado técnico) en caliente respectivamente a una temperatura aproximada de 80 °C.

4.2 Análisis de resultados

4.2.1 Análisis químico

Se realizó un análisis de oro y plata a estos compósitos de relave, subdividido por categoría por ensayos al fuego en el laboratorio químico (ver método 4.1.5 *Análisis químico por oro y plata de los compósitos*) con el fin de saber si tiene alguna tendencia.

Por lo cual, se obtuvo lo siguiente Figura.

Figura N° 4-49: Análisis de Au y Ag de los compósitos de mineral

Fuente: Elaboración propia

Del lado izquierdo se observa las leyes de oro y en el derecho las de plata en gramos por tonelada respectivamente. En la categoría de óxidos se observa que la variación en oro no es tan marcada, puesto que varía de 2 a 3 (gAu/t), mientras que en plata esta entre 10 a 30 (gAg/t). Sin embargo, en la categoría de sulfuros la tendencia es muy pronunciada en cada subcategoría. En el caso del oro, se observa que oscila desde 3 hasta 8 (gAu/t)

y en plata la variación es de 20 a 90 (g Ag/t). En donde, los valores pico se presenta en la subcategoría “sulfuro + + + +”.

En el caso del compósito general, el cual sería como un promedio del mes nos indica que en general existe un relave en oro alrededor de 3 gAu/t con una ley de plata de 40 gAg/ton. Estos valores promedio, si bien es cierto representa la productividad en términos generales. Más no podría considerarse REALES, por la evidencia preliminar descrita anteriormente por cada categoría y subcategoría. Por lo que, se sugiere una mayor investigación a las casusas del por qué sucede esto con los minerales que presentan una mayor intensidad de color.

Por lo tanto, podemos interpretar que existe una cierta correlación entre las leyes de oro y plata con el color de mineral medido con el sistema de Color Munsell. Mas adelante, se mostrará la tendencia calculada con las leyes de cabeza de los minerales entregados.

Tabla 4-18: Análisis químico de muestras de relave

Subcategoría	Ley Au /g/t)	Ley Ag /g/t)
Compósito	3.76	38.08
Óxido +	2.44	9.77
Óxido + +	2.30	12.07
Óxido + + +	2.34	22.00
Óxido + + + +	3.00	18.30
Sulfuro +	3.23	16.40
Sulfuro + +	3.95	20.68
Sulfuro + + +	5.60	41.80
Sulfuro + + + +	7.60	91.20

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Prueba de gravedad específica

La gravedad específica o densidad relativa al igual que la ley y la recuperación metalúrgica del mineral aurífero, no depende de la cantidad de materia sino de su naturaleza. Razón por la cual, al tener 8 subcategorías de minerales agrupadas por su intensidad de color surge la necesidad de comprobar si existe alguna correlación con esta propiedad física.

De la mineralogía descrita en los acápites anteriores, los minerales auríferos presentan una diversidad en cuanto a su composición. Por lo que, tomándose en cuenta el Handbook de Mineralogía de la MSA (Mineralogical Society of America) (Bladh & Et al, 2010). Presentamos, en la siguiente tabla la gravedad específica de cada mineral en su estado más libre de impurezas, acorde con la paragénesis del *Figura N° 3-16*. Esto nos sirve para saber que mineral posiblemente este aportando en la gravedad específica de cada subcategoría de mineral clasificado anteriormente mediante la notación de Munsell.

Tabla 4-19: Gravedad específica de minerales reconocidos

Mineral	Pirita	Galena	Calcopirita	Cuarzo	Esfalerita	Arsenopirita	Pirrotita
	FeS ₂	PbS	CuFeS ₂	SiO ₂	ZnS	FeAsS	Fe _{1-x} S (x=0 0.17)
GE [g/cm³]	5.02	7.58	4.20	2.65	4.00	6.07	4.69

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, como se definió al mineral en el apartado 3.9 *Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación*, éste es una mezcla heterogénea de diversos minerales que en conjunto tienen un color con cierta característica mineralógica.

Se realizó la prueba de gravedad específica a las ocho subcategorías estimadas más el compuesto general. Obteniéndose el siguiente Figura, donde se puede observar que existe una cierta correlación entre el color de mineral y la gravedad específica.

Asimismo, se puede apreciar que el compósito general arroja un valor, que si bien puede considerarse promedio. No obstante, éste no reflejaría la realidad, ya que existen diversos tipos de mineral. La prueba de cada compósito y subcategorías se realizó por triplicado en una balanza analítica de 3 dígitos en las instalaciones del Laboratorio Metalúrgico. El método realizado para la determinación de gravedad específica se tomó del “Tratado de Mineralogía” de (Klockmann & Ramdohr, 1947). Los resultados se pueden observar en el *ANEXO 4*:

Figura N° 4-50: Gravedad específica de los compósitos

Fuente: Elaboración propia

Del Figura, se tiene dos observaciones, la primera, que la coloración de cada compósito de mineral tiene una correlación con la gravedad específica, por lo que surge la necesidad de saber qué mineral es el que predomina más en el compósito estimado, ya que aparentemente se podría decir, según el *Tabla 4-19*, que sea galena, pero se debería tener una mayor certeza. Además, la segunda observación es sobre el compósito general, el cual sí no se clasificaría estos minerales por su mineralogía y color, se tendría una mala percepción de la variedad de minerales que proviene de labores de cateo libre.

4.2.3 Prueba de ataque ácido

Antes de iniciar la prueba se tomó todas las medidas de seguridad para evitar cualquier accidente. Asimismo, se contó con una campana extractora de gases para realizar dichas pruebas.

Figura N° 4-51: Compósito de sulfuros antes del primer ataque ácido

Fuente: Elaboración propia

Se pesó 10 gramos de cada muestra, clasificado por subcategorías, y luego se agregó un volumen de 20 mL de ácido nítrico concentrado. La reacción en los minerales sulfurados fue exotérmica, liberándose de calor, y emanación de vapores nitrosos, razón por la cual se realizó en una campana extractora. Este procedimiento se ejecutó con las 8 muestras clasificadas por el sistema Munsell y el compósito de todas ellas. El tiempo de prueba fue por 60 minutos. En el siguiente Figura se observa la prueba de una muestra al minuto quince (15) y a los cuarenta y cinco (45) minutos.

Figura N° 4-52: Ataque con ácido nítrico del compósito de sulfuro +

Fuente: Elaboración propia

Luego de cada ataque con ácido nítrico se procedió a filtrar, separándose la solución ácida filtrada y el residuo, el cual fue lavado hasta tener un pH igual a 7. Las soluciones son guardadas para una evaluación posterior.

Figura N° 4-53: Compósitos después de ataque de ácido nítrico

Fuente: Elaboración propia

Los residuos fueron llevados a la estufa a secar a una temperatura de 80 °C por 16 horas, ya que después de ello serán atacados con una solución de agua regia, la cual está compuesta por tres partes de ácido clorhídrico y una parte de ácido nítrico en volumen.

Figura N° 4-54: Compósito de sulfuros antes del segundo ataque ácido

Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de disolución de los minerales en el primer ataque, presenta una correlación directamente proporcional entre el color y el peso obtenido en especial en la categoría de Sulfuros. (Ver *Tabla 4-20*).

En el ataque de agua regia se utilizó un volumen de 12 mL. En este caso, la reacción no fue tan exotérmica que el ataque anterior, pero hubo emanación de vapores nitrosos. Este proceso se ejecutó en un tiempo de 60 minutos.

Figura N° 4-55: Ataque con agua regia al compuesto de sulfuro ++

Fuente: Elaboración propia

El producto final es filtrado y el residuo es enviado al horno y la solución ácida es almacenada para su posterior análisis. Cabe resaltar que, en los sulfuros, existe la misma correlación directa de intensidad de color y el porcentaje de disolución con el agua regia. (Ver *Figura N° 4-57*).

Figura N° 4-56: Compósitos de sulfuros segundo ataque ácido

Fuente: Elaboración propia

El registro final fue tener pesos de cada muestra con su respectivo ataque ácido y soluciones ácidas, las cuales presentaron diferentes coloraciones. De los que, podemos inferir cualitativamente de que puede estar compuesto. Ver *Figura N° 4-58*.

Tabla 4-20: Porcentajes de disolución de compósitos

Subcategoría	Compósito	Óxido +	Óxido ++	Óxido +++	Óxido ++++	Sulfuro +	Sulfuro ++	Sulfuro +++	Sulfuro ++++
Ácido Nítrico (g)	41.00%	36.90%	42.30%	52.70%	45.20%	45.20%	50.70%	52.70%	63.40%
Agua Regía (g)	27.60%	10.31%	11.30%	10.20%	19.90%	9.80%	15.70%	25.80%	40.70%

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4-57: Disolución de minerales en ácidos

Fuente: Elaboración propia

De la imagen mostrada, se puede observar que existe una marcada correlación del porcentaje de disolución en la categoría “Sulfuro”. No obstante, en los óxidos su comportamiento similar excepto el “Óxido + + +”, tanto en el ataque con ácido nítrico como en agua regia. Asimismo, de la literatura (ver 3.3.4 Mineralogía) se tiene que el ácido nítrico tiene la capacidad de oxidar los minerales de pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS) y marcasita (FeS_2) (Saba, Mohammad, Rashchi, & Moghaddam, 2011). Sin embargo, el uso del agua regia es para disolver los metales nobles y otros que puede contener debido a que este reactivo es un excelente agente oxidante y la vez un acomplejante de metales nobles. De la tabla se observa que en el “sulfuro + + + +” seguía disolviéndose en mayor proporción respecto a los otros sulfuros.

De los sólidos obtenidos es difícil sacar la ley debido a que el peso es muy pequeño para ser analizado por ensayo al fuego. Sin embargo, la literatura afirma que debe obtenerse sólo dióxido de silicio o mejor dicho cuarzo.

Asimismo, de las soluciones filtradas se presenta a continuación la intensidad de coloración. El orden va derecha a izquierda, comenzando por el “Óxido +” hasta “Óxido + + + +”, de allí inicia el “Sulfuro +” hasta el “Sulfuro + + + +” tanto para el ácido nítrico (vista superior) como para el agua regia (vista inferior).

Figura N° 4-58: Soluciones filtradas después de cada ataque ácido

Fuente: Elaboración propia

Se enviaron analizar todas las muestras, vía instrumental, pero los valores obtenidos fueron menores a los del límite de detección, por lo que sólo nos quedó interpretar a partir de la coloración de las soluciones. En los sulfuros, se observa una intensidad de la solución ácida al ir aumentando la subcategoría de sulfuro, mientras que en el óxido ocurre lo contrario que al ir aumentando la subcategoría la intensidad de color disminuye. En el agua regia, en los sulfuros no presenta mucha coloración, pero en los óxidos hay una coloración ascendente según la subcategoría.

4.3 Análisis estadístico

4.3.1 Análisis deductivo

Después de haber realizado la clasificación de los relaves, mediante el uso de las tablas de colores Munsell, y, asimismo, haber realizado su respectiva caracterización por medio de ensayos químicos y pruebas metalúrgicas. Es necesario hacer una regresión y observar si la distribución de los datos de cada compósito guarda la misma correlación de resultados obtenidos, ya que cada uno de ellos representa una cierta población que exhibe la misma característica organoléptica. De mismo modo, como se hizo en el apartado 4.1.4 *Información de las muestras de investigación*, en los *Figura N° 4-46* y *Figura N° 4-47* se realizaron diagramas de cajas para visualizar la simetría de distribución de los datos; los valores atípicos; máximos y mínimos; la mediana; y, por último, los percentiles 25 y 75, los que nos ayuda a detectar el 50% de los datos de la población.

Figura N° 4-59: Diagrama de cajas de ley de oro por subcategorías

Fuente: Elaboración propia

Del Figura de cajas se observa que, de las leyes de cabeza en los óxidos, los valores de la mediana tienen una tendencia ascendente, lo cual corrobora la caracterización

realizada por cada compósito. Sin embargo, su dispersión de datos es alta a comparación de los sulfuros debido a que la cantidad de datos, la cual es inferior a 30. Además, su distribución es asimétrica. No obstante, en el lado de los sulfuros, la dispersión del 50% de datos es pequeña, además la correlación de la mediana es creciente, lo cual corrobora los resultados obtenidos a través de los experimentos realizados. Sin embargo, hay presencia de valores atípicos en la sub categoría *Sulfuro* “+ + + +”, pues presenta una mayor dispersión a comparación de los demás “*Sulfuros*”. Cabe resaltar, que la cantidad de datos de cada subcategoría “*Sulfuros*” son mayores a los 30.

Del diagrama de cajas se obtiene los siguientes datos que se muestran a continuación.

Tabla 4-21: Resultados del diagrama de cajas por subcategorías

Subcategoría	# Muestras	Media	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
	unid	g Au/ton	g Au/ton	g Au/ton	g Au/ton	g Au/ton	g Au/ton
Óxido +	10	11.96	4.98	7.14	9.16	17.89	22.79
Óxido + +	6	22.53	7.11	8.54	11.52	39.31	48.92
Óxido + + +	14	37.17	5.83	14.50	19.34	32.63	128.90
Óxido + + + +	21	39.26	5.02	12.12	27.18	77.70	101.15
Sulfuro +	79	17.58	3.38	12.37	15.44	19.53	60.34
Sulfuro + +	107	20.98	6.04	15.01	19.81	24.86	61.22
Sulfuro + + +	96	31.81	7.21	24.37	28.81	38.93	60.08
Sulfuro + + + +	37	63.60	29.48	46.58	53.94	80.20	143.22
Total de Muestras	370						

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, el color de cada muestra tiene una correlación, sea con la media o la mediana. No obstante, para esta parte del análisis no consideraremos a la media, ya que éste toma en cuenta los valores extremos de los datos, lo cual hace que el valor “promedio” tenga un sesgo. Sin embargo, la mediana representa el valor que se encuentra en el centro de la distribución de datos y el cual está dentro del 50% (Q1 y Q3).

4.3.2 Análisis inductivo

Hasta este punto, se expuso lo que se puede deducir de cada color respecto a su ley o contenido de oro de los datos obtenidos del laboratorio metalúrgico, tanto de la ley de cabeza y relave. Sin embargo, lo que se quiere es intuir si el color nos podría estimar una estas características, con cierto grado de confiabilidad, de un camión que recién llegue a la planta de beneficio antes de ser procesado, **es decir caracterizar el mineral In Situ**. Para lo lograr dicho objetivo, se tomará los datos de las leyes de cabeza clasificados por su coloración mediante el uso de las tablas Munsell. En donde, se tomará a la ley de oro como una variable continua, debido a que es una variable aleatoria. Acto seguido se obtendrá, por cada subcategoría, datos como la media, desviación estándar, máximos, mínimos, mediana y tamaño de muestra. De ello, se procederá a realizar un histograma con el fin de agrupar las leyes en un cierto rango o clase, donde la cantidad de estos estará definida por el número de datos. A partir, de la media y desviación estándar se procederá a realizar una curva suavizada, la cual representará a la curva de distribución normal.

A continuación, en los Figuras, se presenta el histograma y los valores de **distribución normal** por cada subcategoría de sulfuros respecto a sus leyes. Sin embargo, no se presenta los óxidos, debido a que su tamaño de muestra es inferior a 30.

Figura N° 4-60: Distribución de leyes del Sulfuro +

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4-61: Distribución de leyes del sulfuro + +

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4-62: Distribución de leyes del sulfuro + + +

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4-63: Distribución de leyes del sulfuro + + + +

Fuente: Elaboración propia

De los Figuras, para tener una curva de distribución normal se trató de mantener un **coeficiente de asimetría menor a 1**, lo cual relaciona la media con la mediana. Los Figuras sin normalizar se muestran en el *Anexo N° 5*.

Es necesario hacer presente que no se realizó diagramas de distribución de los datos de la categoría “Óxidos” debido a que la cantidad de datos es inferior a 30. Por lo que, para tratarlo estadísticamente se trabajara con el estadístico de t de student.

Tabla 4-22: Resultados de la normalización de datos

Leyes de oro	Óxido +	Óxido ++	Óxido +++	Óxido ++++	Sulfuro +	Sulfuro ++	Sulfuro +++	Sulfuro ++++
Tamaño	10	6	11	13	69	102	96	34
Mínimo	4.98	7.11	5.83	7.15	8.25	10.42	7.21	29.48
Q1	7.14	8.54	13.61	12.12	13.11	15.01	24.40	44.95
Mediana	9.16	11.52	16.53	12.98	15.93	19.64	28.81	52.84
Media	11.96	22.53	18.78	20.17	16.83	20.36	31.81	59.09
Q3	17.89	39.31	24.32	29.01	19.18	23.75	38.94	75.75
Máximo	22.79	48.92	33.28	47.96	33.26	38.95	60.08	105.94
Asimetría	0.51	0.93	0.43	0.99	0.78	0.71	0.40	0.52
Desviación Std	6.44	20.26	8.62	12.16	5.83	6.96	11.32	19.88

Fuente: Elaboración propia

Para encontrar el intervalo de confianza de cada subcategoría. es preciso definir la variable y que distribución sigue cada subcategoría. Es decir, sea: $\mathbf{X} = \text{Óxido}_i$ o Sulfuro_i , donde $i = +, ++, ++, +++$ una variable aleatoria continua, de ley o contenido de oro en gramos por tonelada métrica, que sigue una distribución normal $\mathbf{N}$ con parámetros de media μ y desviación estándar σ , la cual representaremos de la siguiente manera: $X_i \rightarrow N(\mu; \sigma)$.

Tabla 4-23: Distribución normal de ley por subcategorías

Variable	sigue	Distribución normal
Ley Au – Óxido “+”	→	N (11.96; 6.44)
Ley Au – Óxido “++”	→	N (22.53; 20.26)
Ley Au – Óxido “+++”	→	N (18.78; 8.62)
Ley Au – Óxido “++++”	→	N (20.17; 12.16)
Ley Au – Sulfuro “+”	→	N (16.83; 5.83)
Ley Au – Sulfuro “++”	→	N (20.36; 6.96)
Ley Au – Sulfuro “+++”	→	N (31.81; 11.32)
Ley Au – Sulfuro “++++”	→	N (59.09; 19.88)

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, de la variable aleatoria X_i con Distribución Normal $N(\mu, \sigma)$, el objetivo es construir un intervalo de confianza para el parámetro μ , basado en una muestra de tamaño n de la variable. Sin embargo, para aplicar los estadísticos respectivos, sea el Z o t -student, varianza conocida o desconocida. Se fija que la categoría óxidos será de varianza desconocida, ya que no se tiene la cantidad necesaria para estimar la población por subcategorías. Caso contrario, es la categoría Sulfuros, pues se tiene una buena cantidad para estimar su población.

Tabla 4-24: Estadísticos de prueba

Intervalo de confianza	
Para media μ con σ conocida	Para media μ con σ desconocida
$\bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	$\bar{X} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$

Fuente: (V. Spiridonov & et al, 1973)

Donde:

α es el nivel de significancia; y

$1 - \alpha$ es el nivel de confianza

De los estadísticos de prueba y los datos obtenido generamos el intervalo de confianza según cada subcategoría de mineral clasificada por el sistema Munsell. Por lo tanto, con un nivel confianza del 95% podemos decir las leyes de oro por cada sub categoría se encuentran entre los límites inferior y superior. En la subcategoría Óxido “+ +” se tiene una gran dispersión debido a la poca cantidad de datos.

Tabla 4-25: Intervalo de confianza de ley de oro

Subcategoría	n	1- α	Límite inferior	Límite superior
Ley de Au - Óxido “+”	10	95%	7.36	16.57
Ley de Au - Óxido “+ +”	6	95%	1.26	43.80
Ley de Au - Óxido “+ + +”	11	95%	12.99	24.58
Ley de Au - Óxido “+ + + +”	13	95%	12.82	27.52
Ley de Au - Sulfuro “+”	69	95%	15.45	18.20
Ley de Au - Sulfuro “+ +”	102	95%	19.01	21.71
Ley de Au - Sulfuro “+ + +”	96	95%	29.55	34.07
Ley de Au - Sulfuro “+ + + +”	34	95%	52.41	65.77

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, que se hizo el análisis para la ley de oro, a continuación, se procederá para la variable de recuperación metalúrgica. Resaltamos, que ambas variables son propiedades intensivas de la materia, es decir que no depende de la cantidad de esta. Por lo que, se tendrá mucho criterio al normalizarlo. Del diagrama de cajas de los datos agrupados por subcategorías respecto a la recuperación metalúrgica. Se observa, que la dispersión en la categoría Óxidos, es mínima respecto a los de la categoría de Sulfuros. Una primera acotación sería debido a la cantidad de datos.

Figura N° 4-64: Diagrama de cajas de recup. met. por subcategorías

Fuente: Elaboración propia

Se procede a normalizar cada subcategoría con el fin de obtener un intervalo de confianza por cada ítem. Por lo que, ajustamos el coeficiente de asimetría:

Tabla 4-26: Datos normalizados para Recup. Met.

Recup. Met	Óxido +	Óxido ++	Óxido +++	Óxido ++++	Sulfuro +	Sulfuro ++	Sulfuro +++	Sulfuro ++++
Tamaño	9	6	11	20	43	95	86	34
Mínimo	80.82	88.57	88.51	85.79	80.18	75.39	80.32	84.19
Q1	85.83	89.94	89.06	88.96	82.95	80.65	83.19	86.77
Mediana	89.55	90.36	90.09	89.93	85.46	83.60	84.17	88.87
Media	87.50	90.31	90.55	89.90	85.04	83.81	84.73	88.65
Q3	89.85	39.31	92.31	91.56	87.23	87.10	86.16	90.34
Máximo	91.38	92.18	92.31	92.31	88.99	90.62	90.98	92.31
Asimetría	-0.96	0.21	0.06	-0.59	-0.23	-0.07	0.60	-0.24
Desviación Std	3.66	1.17	1.73	1.99	2.64	3.91	2.52	2.43

Fuente: Elaboración propia

Definimos a: $\mathbf{X} = \text{Óxido}_i$ o Sulfuro_i , donde $i = "+"$, $++$, $+++$, $++++$ una variable aleatoria continua, recuperación metalúrgica mediante cianuración directa, que sigue una distribución normal N con parámetros de media μ y desviación estándar σ , la cual representaremos de la siguiente manera: $X_i \rightarrow N(\mu; \sigma)$.

Tabla 4-27: Distribución normal de Recup. Met.

Subcategoría	sigue	Distribución normal
<i>Recup. Met - Óxido "+"</i>	→	N (87.50; 3.66)
<i>Recup. Met - Óxido ++</i>	→	N (90.31; 1.17)
<i>Recup. Met - Óxido +++</i>	→	N (90.55; 1.73)
<i>Recup. Met - Óxido ++++</i>	→	N (89.90; 1.99)
<i>Recup. Met - Sulfuro "+"</i>	→	N (85.04; 2.64)
<i>Recup. Met - Sulfuro ++</i>	→	N (83.81; 3.91)
<i>Recup. Met - Sulfuro +++</i>	→	N (84.73; 2.52)
<i>Recup. Met - Sulfuro ++++</i>	→	N (88.65; 2.43)

Fuente: Elaboración propia

Para encontrar los límites de confianza al 95%, utilizamos los estadísticos Z y t -student, según correspondan. Para la categoría Óxidos se utilizará el t - student y para la categoría Sulfuro el estadístico de Z . Obteniéndose el siguiente cuadro.

Tabla 4-28: Intervalo de confianza de Recup. Met.

Subcategoría	n	1- α	Límite inferior	Límite superior
<i>Recup. Met - Óxido "+"</i>	9	95%	84.68	90.31
<i>Recup. Met - Óxido ++</i>	6	95%	89.08	91.54
<i>Recup. Met - Óxido +++</i>	11	95%	89.38	91.71
<i>Recup. Met - Óxido ++++</i>	20	95%	88.97	90.83
<i>Recup. Met - Sulfuro "+"</i>	43	95%	84.25	85.83
<i>Recup. Met - Sulfuro ++</i>	95	95%	83.02	84.59
<i>Recup. Met - Sulfuro +++</i>	78	95%	84.20	85.26
<i>Recup. Met - Sulfuro ++++</i>	34	95%	87.84	89.47

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se logra correlacionar, tanto la ley de oro como la recuperación metalúrgica respecto a su coloración en base al sistema Munsell de rocas con un grado de confiabilidad del 95%.

4.4 Aplicación

4.4.1 Clasificación de minerales antes de su procesamiento

El impacto en tonelaje tiene relación directa con los insumos de (transporte, energía en la operación de conminución, tiempo de retención en tanques de cianuración, espesador y espacio en la RELAVERA) y reactivos (cianuro, polvo de cinc, fundentes) requeridos para su tratamiento, porque su costo está en función a la cantidad de materia a procesar. No obstante, la parte que no depende de la materia son las leyes de mineral y recuperación metalúrgica, ya que cada uno de ellos depende de sus características geológicas, mineralógicas entre otras. Así que, es necesario realizar una tabla y Figuras de la ley de mineral calculada y una recuperación metalúrgica calculada de los minerales estimados a partir de las tablas de colores de Munsell, lo cual conllevará a interpretar su comportamiento. La siguiente tabla es un resumen de los promedios de cada subcategoría respecto a su color Munsell, en donde se tomó en cuenta no el promedio estadístico sino que, además, el tonelaje entregado por cada subcategoría.

Tabla 4-29: Resultados de los compósitos por color

Categoría	Subcategoría	Ley (g/ton)	Recuperación Metalúrgica (%)
Compósito		28.37	86.45%
Óxido	+	13.19	88.36%
Óxido	++	22.16	90.95%
Óxido	+++	38.29	91.68%
Óxido	++++	38.31	90.75%
Sulfuro	+	18.03	84.10%
Sulfuro	++	21.13	83.66%
Sulfuro	+++	31.54	85.31%
Sulfuro	++++	65.13	89.27%

Fuente: Elaboración propia

Estos datos son obtenidos en base a la data del mes de abril del 2017, de la entrega de todos los minerales provenientes de labores de cateo libre. Asimismo, se adicionó el compósito, el cual hace referencia a la mezcla de todas las subcategorías generando un

sesgo, tanto positivo como negativo. En cambio, al realizar la clasificación y caracterización de estos minerales mediante el sistema Munsell de rocas, se obtiene un comportamiento entre las características del mineral y su color estandarizado. Esto permite clasificar dichos minerales antes de su procesamiento, pues como se mencionó la cantidad de ellos y característica impactará directamente en los insumos del proceso como de reactivos. Cabe, precisar que esta recuperación metalúrgica está en base a una prueba de cianuración directa, tal y como se realiza en planta de beneficio.

Otra manera de ver este cuadro es por medio de un Figura, en el cual proporciona un comportamiento más ajustado a la realidad.

Figura N° 4-65: Ley calculada de oro por compósito

Fuente: Elaboración propia

Del Figura se observa, que el compósito o promedio de la ley de mineral que provienen de labores de cateo libre es aproximadamente 30 g/ton. Sin embargo, vemos que la subcategoría de “Sulfuro ++++” tiene una ley promedio aproximada a 65 g/ton seguido de “Óxido ++++” y “Óxido +++” que tienen aproximadamente 38 g/ton, continuando con el “Sulfuro +++” con una ley promedio de 31 g/ton; y finalmente el “Sulfuro ++” y “Sulfuro +” presentan leyes de 21 y 18 g/ton respectivamente.

Mientras que, en recuperación metalúrgica, se presenta una situación similar correspondiente al promedio o compósito cuyo valor es de 86% aproximado. No obstante, los que superan esta recuperación promedio es el “Sulfuro + + + +” y toda la categoría de “Óxidos”. Sin embargo, tanto la ley de oro y la recuperación metalúrgica está muy ligadas con el tonelaje tratado, ya que de allí se obtiene las onzas procesadas. No obstante, se observa que las subcategorías sulfuros “+”, “+ +”, “+ + +”, presentan recuperaciones menores a la del promedio y por ende lo que no se recupera del proceso se dirige a la relavera. Asimismo, cabe precisar, en tonelaje, cuánto se dirige a este destino.

Figura N° 4-66: Recup. Metalúrgica del oro calculada por compósito

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Impacto del tonelaje según clasificación y caracterización

El impacto en tonelaje, que se procesó en el mes de abril del 2017, según cada subcategoría es como se muestra en la siguiente gráfica. Donde se observa que la mayor parte de tonelaje lo aporta los sulfuros versus los 15% de óxidos en conjunto aproximadamente. Es decir, el 85% del tonelaje procesado por planta de beneficio son sulfuros. De estos, los que más aportan son los de la subcategoría “Sulfuro + +” (30%) y “Sulfuro + + +” (25%) continuando el “Sulfuro +” (20%) y finalmente el “Sulfuro + + + +” (10%) aproximadamente.

Figura N° 4-67: Distribución de tonelaje por compósito

Fuente: Elaboración propia

Del Figura realizado, porcentaje del tonelaje según subcategoría, más lo visto en el apartado anterior, en donde el tonelaje influye de manera directa en la obtención de onzas de oro procesadas ya que del acápite 3.9 *Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación* se tiene la función a maximizar, la cual es la cantidad de onzas de oro procesado.

$$Onz Au_{procesado} = \sum_{i=0}^n Onz Au_i = \sum_{i=0}^n Ley Au_i \times Ton_i \times \% Recup. Met._i$$

Donde: i es la zona de extracción.

Entonces, se puede decir que el material que ingreso por planta de beneficio en el mes de abril del 2017, contabilizando sólo el “Sulfuro +” y “Sulfuro + +”, estos representan el 50% en tonelaje tratado con una ley media menor [18 - 21] g Au/ton a la ley del compósito promedio de mineral [28.37] g Au/ton. Además, estas subcategorías son las que menos benéfico se obtiene mediante el proceso metalúrgico de cianuración directa, puesto que su recuperación metalúrgica es aproximadamente 84%. Por lo que, la condición del mineral sugiere que se traten solos, ya que su relave contendrá contenido de oro, los cuales podrían ser almacenados hasta que se tenga un método metalúrgico para recuperar el oro que contiene. Estos resultados tienen un grado de confiabilidad al 95%, *Ver 4.3 Análisis estadístico*. Es decir, antes de que cada mineral entregado sea procesado, se debería evitar la mezcla con minerales de la subcategoría **Sulfuro “+ + + +”** y así la recuperación y ley promedio varíe drásticamente. Esto es, porque la mineralogía es distinta (ver *4.1.7 Prueba de ataque ácido a los compósitos*), ya que su comportamiento es totalmente diferente. Además, cambiaría las condiciones del proceso, ya sea en leyes de oro, como gravedad específica del mineral en el proceso y la misma recuperación metalúrgica. Cabe precisar, en base a los resultados obtenidos de un estudio mineralógico del compósito general, que es una mezcla de todas las subcategorías, del mes de mayo del 2017 que se realizó en un laboratorio de Chile., en el que las muestras existen diferentes proporciones de oro y plata, los cuales podrían ser causales de la refractariedad. Esto refuerza lo desarrollado en la presente teoría referencial de la investigación en el apartado *3.9 Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación*, en *Tabla 3-11: Relación de Au/Ag mayor a 1* y *Tabla 3-12: Relación de Au/Ag menor a 1*. Porque, demuestra que existe diferentes calidades de oro proveniente de cada zona de extracción de labores de cateo libre.

4.4.3 Reconocimiento de zonas que aportan minerales

De la metodología propuesta aplicado a los datos del mes de abril del año 2017 en las labores de cateo libre, se obtiene la siguiente matriz (*Tabla 3-13: Matriz de solución de minerales*). Asimismo, el cuadro donde está el nombre del color según el sistema Munsell de rocas (*Tabla 3-14: Notación Munsell por sub categorías*). En la siguiente matriz se presenta los tonelajes recibidos en planta de beneficio Maraón según su procedencia y su respectiva subcategoría mineralógica. Asimismo, en vez de los tonelajes se puede indicar la ley promedio y la recuperación metalúrgica promedio con un cierto grado de confiabilidad (95%).

Tabla 4-30: Matriz de zonas de impacto y compósitos

Zonas de impacto	Óxido				Sulfuro				Total general
	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	
Pataz (Genérico)	20.3	89.9	192.2	308.8	1,073.6	2,257.1	1,786.5	521.8	6,250.2
Atahualpa	21.8			29.5	430.3	43.0	22.9		547.4
Sta Maria	39.1	44.9	79.8	55.1	105.8	20.8	70.3		415.9
Marleny	40.1					89.8	97.8	68.1	295.8
Karola	53.8			15.8	48.4	20.1	55.8	31.1	225.0
Huayos	17.3						49.8	104.9	172.1
La Lima (Genérico)	11.4				48.4			14.5	74.3
Pencas	46.1	14.9			8.6				69.6
Suyubamba (Generico)			45.0	22.5					67.5
Glorita	16.8					27.0	16.1		59.9
Choloque	36.1					18.1			54.2
Cortadera	14.4						19.9		34.3
Total general	317.2	149.7	316.9	431.6	1,714.9	2,475.8	2,119.3	740.5	8,266.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-31: Nombres de colores de las subcategorías

Categoría	Notación Munsell
Óxido +	10YR 8/2
Óxido ++	10YR 7/4
Óxido +++	10R 6/6
Óxido ++++	10R 6/4
Sulfuro +	5Y 6/1
Sulfuro ++	5YR 6/1
Sulfuro +++	5YR 4/1
Sulfuro ++++	5GY 2/1

Fuente: Elaboración propia

4.4.4 Evaluación Económica

Para evaluar esta investigación a nivel económico se necesitará determinar los costos que involucra la implementación del sistema Munsell y la duración de esta ejecución. Para luego compararlo con el proceso actual, en términos de VAN, TIR y costo de oportunidad. Pues, el mineral proveniente de Cateo Libre que llega a la planta de beneficio es procesado en las próximas 12 horas. Mientras qué, con el nuevo enfoque se separaría por subcategorías de mineral in situ a modo de stocks de mineral clasificado y caracterizado al instante con un grado de confiabilidad del 95%. Este producto, podrá procesarse en las siguientes horas, pero con un comportamiento estable, lo cual podrá ajustarse los parámetros de la planta para tratar dicho mineral. Pues, en la actualidad el fin de mezclar todos estos minerales es mantener la ley de mineral constante al igual que el consumo de reactivos.

Asimismo, sí se realizará de este modo, los relaves obtenidos, de los minerales con las más bajas recuperaciones metalúrgicas debido al proceso de cianuración directa, podría almacenarse en una relavera exclusiva en la que estaría el mineral molido esperando a ser procesado mediante un método diferente del usado. Logrando separar los relaves que aún tienen contenido de oro, ya que en la actualidad todos los relaves son mezclados y enviados a los depósitos de relave de Libias y Hualanga.

Por ende, sí se quiere gestionar estos minerales, se realizará una valoración en función al costo de oportunidad, el cual dependerá del tonelaje tratado; tipo de mineral, sea óxido o sulfuro; y su color, según notación Munsell, porque se correlacionan con la ley de oro y recuperación metalúrgica. Ver siguiente Figura.

Tabla 4-32: Resumen de subcategorías

Categoría	Subcategoría	Ley (g/ton)	Recuperación Metalúrgica (%)	Tonelaje (ton)	Participación Tonelaje (%)
Compósito		28.37	86.45%	8266.0	100.00%
Óxido	+	13.19	88.36%	317.20	3.84%
Óxido	++	22.16	90.95%	149.70	1.81%
Óxido	+++	38.29	91.68%	316.90	3.83%
Óxido	++++	38.31	90.75%	431.60	5.22%
Sulfuro	+	18.03	84.10%	1714.90	20.75%
Sulfuro	++	21.13	83.66%	2475.80	29.95%
Sulfuro	+++	31.54	85.31%	2119.30	25.64%
Sulfuro	++++	65.13	89.27%	740.50	8.96%

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar nuestra propuesta de gestión, se realizará un **análisis de sensibilidad cualitativa en función al precio del oro y el aumento de la cantidad de onzas de oro procesado debido al aumento de la recuperación metalúrgica de los minerales con baja recuperación por su respectivo tonelaje**. Es así como, las subcategorías “Sulfuro +”, “Sulfuro ++” y “Sulfuro +++”, que representaron en el mes de evaluación el 75% del tonelaje total tratado, deberán ser procesados aparte por medio de campañas de procesamiento de mineral en la planta de beneficio existente, modificándose los parámetros convenientes. Toda la categoría “Óxido” y la subcategoría “Sulfuro +++” no se modificará su condición de operación, Es decir, se procesará por separado por ser mineralógicamente diferentes, pero los cambios de parámetros de la planta de beneficio no serán tan distintos a los actuales. Todo esto, es para evaluar si hubiera un ascenso en la recuperación metalúrgica mediante los cambios en los parámetros de la planta con los minerales de baja recuperación metalúrgica. Se asumirá, que el ascenso de la recuperación será desde 0.5% hasta 1.5%. Asimismo, se evaluará escenarios de precios del metal dorado, el cual estará en el rango de los [1,100 – 1,400] \$/oz Au versus la ganancia generada por mes acorde al incremento de la recuperación obtenida.

Es necesario resaltar que esta evaluación no es una valoración precisa, ya que se tomó el precio internacional para un metal refinado de oro y en nuestro caso tenemos un mineral de oro procesado, al cual le falta agregar costos asociados de proceso, sea de fundición y refinación, como los de comercialización y administración. Por lo que, este Figura sólo nos dará una idea de lo que se podría ganar al mes, sí se implementa el uso del sistema Munsell como clasificación y caracterización de minerales para realizar campañas de procesamiento.

Figura N° 4-68: Análisis sensibilidad de ganancia por mes

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- 1) Del objetivo general planteado, se logró caracterizar los minerales auríferos provenientes de labores de cateo libre, mediante el uso del sistema Munsell para rocas, antes de su procesamiento metalúrgico con un grado de confiabilidad del 95% y optimizando la planificación del proceso. Esto mediante, una matriz, en la que se presenta los colores (subcategorías) de cada mineral según la zona de extracción, donde el contenido de cada intersección puede representar el tonelaje total, ley de mineral aurífero promedio o el porcentaje de recuperación metalúrgica promedio. Pues, la función objetivo fue la de maximizar la cantidad de onzas de oro procesadas, la cual depende directamente de estas tres variables antes mencionadas y del color del mineral. Asimismo, el enfoque de la solución se realizó en función a la estrategia del negocio de la organización.
- 2) Se demostró la correlación entre la propiedad física, organoléptica, del color con su mineralogía para caracterizar minerales. En función de la teoría realizada en el acápite 3.5.1 Mineral y a la definición de mineral (ver 3.9 *Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación*) como una mezcla heterogénea de minerales de composición definida física y químicamente. Del mismo modo,

bajo el punto de la termodinámica (ver *Figura N° 3-9: Eh - pH del Fe-S-H₂O*) se demostró que la presencia de óxidos es producto de la reacción, termodinámicamente posible, del sulfuro con el oxígeno del medio ambiente y es promovida si existe presencia de agua, ya que ésta hidroliza a los minerales disolviéndolos.

- 3) Se logró una correlación entre el color del mineral clasificado por el sistema Munsell con sus leyes o contenido de oro mediante intervalos de confianza con un grado de confiabilidad del 95%. De la teoría propuesta en el 3.9 *Análisis específico del fenómeno que constituye el objeto de investigación*, el mineral para este estudio es una mezcla heterogénea de minerales con características definidas. Esto hace que, muy aparte de las mezclas de minerales es la presencia del oro en forma de oro nativo como electrum, en donde las proporciones de plata y oro no están definidas. Tal como se muestra en *Figura N° 3-29: Relación de Au/Ag mayor a 1* y *Figura N° 3-30: Relación de Au/Ag menor a 1*. Asimismo, un estudio mineralógico del compósito del mes de mayo del 2017 *Figura N° 3-31: Minerales de la relación de Au/Ag* y *Figura N° 3-32: Fases brillantes de mineral* se demuestra que existe diferentes proporciones de oro y plata, lo cual sostiene que puede ser causal de la refractariedad del mineral. Por lo que, según el estudio realizado, se podría intuir que dicha refractariedad está en las subcategorías de Sulfuro “+”, Sulfuro “+ +”, Sulfuro “+ + +”.
- 4) Del mismo modo, se consiguió la correlación entre la variable de la recuperación metalúrgica con los colores estandarizados, según el sistema Munsell, con un grado de confiabilidad del 95%. En donde, los minerales que provienen de todas las zonas de cateo libre tienen diferentes características geológicas, lo cual hace que se comprenda más la propiedad intensiva de esta variable, ya que no depende de la

cantidad de materia sino de su formación, su génesis. Razón por la cual, para comprender la caracterización de esta variable se tuvo que tener en cuenta la formación del yacimiento tipo orogénico del Batolito de Pataz, ver *Figura N° 3-13: Diagrama conceptual – formación del yacimiento*. Asimismo, la geocronología permitió ubicar en qué periodo de formación, de la roca huésped, y de la posterior mineralización se formó o, en todo caso, sufrió el mineral aurífero cambios mineralógicos, ver *Figura N° 3-9*. Además, se tuvo como apoyo la paragénesis de mineral, Ver *Figura N° 3-*, el cual nos expresó la mineralogía en función del tiempo, es decir en orden cronológico, en donde sí se tuvo primero una cierta condición geológica y esta cambiará gradualmente aparecería un determinado mineral como resultados del anterior y podría que éste último se convierta en un tercero, haciendo que el mineral sufra de recristalización, según cada estadio. Este último, más la teoría formulada hace que este sea causal de la refractariedad del oro en nuestra zona de estudio. Ver 3.3.4 Mineralogía.

5.2 Recomendaciones

Este enfoque, mediante el uso del sistema de colores Munsell para la caracterización de minerales auríferos es nuevo. Razón por la cual, presenta limitaciones, como que sólo se aplica a los mineros artesanales de las labores de cateo libre, debido a su extracción de manera selectiva. Pero, sobre todo, lo más importante es por la geología del Batolito de Pataz y su yacimiento tipo orogénico, ya que presenta minerales auríferos con leyes relativamente altas. Por lo que, se sugiere los siguientes puntos para complementar de manera inmediata el uso del sistema de color Munsell para caracterizar los minerales.

- 1) Realizar una base de datos de todos los minerales que provienen de labores de Cateo Libre, mediante el uso de las tablas de color estándar Munsell en la matriz de solución presentada en la investigación con el fin de corroborar lo producido versus lo estimado por la clasificación del sistema Munsell.
- 2) Evaluar la granulometría en el producto del canchado secundario versus el colore del mineral, pues al tener una granulometría más pequeña se puede obtener una mayor definición del color, según el sistema Munsell, y, por ende, se puede tomar una decisión mucho más precisa antes de su procesamiento metalúrgico.
- 3) Realizar pruebas, las mismas que se realizó en la presente investigación para identificar la relación de presencia de oro nativo y electrum. Asimismo, realizar el Diagnósticos de lixiviación mediante ataques ácido de manera sistemática con el fin de encontrar las características mineralógicas del mineral aurífero. Además, se debe realizar análisis químico. ICP 32 elementos para tener en cuenta que elementos y que comportamiento tiene cada subcategoría.
- 4) Realizar pruebas metalúrgicas con minerales de cabeza caracterizados por el sistema Munsell para corroborar las estimaciones realizadas y así ajustar el modelo de solución.

5.3 Sugerencias para investigaciones posteriores

La presente investigación es pragmática, ya que me permite tomar decisiones en campo. Además, el impacto en la rentabilidad mensual de la organización es considerable, a modo conceptual, ya que sólo se consideró las onzas recuperadas sí se realizará campañas de procesamiento. Sin embargo, todo tiene un fundamento geológico, mineralógico, minero, metalúrgico y químico. Por lo que, las futuras investigaciones podrían estar dirigidas a:

- 1) Ajustar al modelo presentado mediante teoría de errores.
- 2) Aplicar geoestadística a los colores de minerales de las labores de cateo libre según zona de impacto y los tres parámetros estudiados, tonelaje, ley promedio de oro y recuperación metalúrgica promedio.
- 3) Relacionar el color del mineral y la capacidad extracción o grado de dilución que tienen los mineros artesanales de las labores de cateo libre
- 4) Relacionar la coloración del mineral y su comportamiento mineralógico mediante diagnóstico de lixiviación sistematizado.
- 5) Desarrollar de aplicaciones tecnológicas para determinar los colores en campo, basado en la tabla de colores de Munsell.

5.4 Valoración del trabajo de investigación

La presente investigación cumple en aportar, DE FORMA PRÁCTICA, el cómo caracterizar un mineral, proveniente de las labores de Cateo Libre, en campo antes de ingresar al proceso de beneficio de mineral, lográndose tomar una decisión en función al sistema de color de Munsell para minerales de granulometría menor a los 3/8" de diámetro. Sin embargo, es NECESARIO realizar una comprobación visual de la existencia de minerales en el ingreso al chancado primario, pues existe la posibilidad de

contaminación del mineral mediante materiales interferentes al beneficio como por ejemplo madera quemada, relaves de ajenos procesos y otros. Por lo que, en términos de calidad, el cliente (Planta de beneficio) tiene requisitos que cumplir, los cual están acorde a los objetivos organizacionales; y el proveedor (labores de cateo libre) debe satisfacer estos requerimientos. Entonces, un cliente cuando recibe un producto debe realizar un control de calidad para tener la certeza de que este insumo es lo que necesita para su proceso, y en este caso en un tiempo récord para tomar una decisión. Pues, los resultados de ley de mineral y recuperación metalúrgica, que laboratorio metalúrgico entrega es de 3 días mínimo. Donde, para este tiempo el mineral ya habrá echo su recorrido por todas las etapas del proceso de beneficio. Razón por la cual, se requiere tomar una decisión en campo, en función a una característica, qué me indique una correlación con las características mineralógicas de estos minerales, ya que se comprobó su impacto al ser gestionado adecuadamente. No obstante, para lograr esta correlación se tuvo que recurrir a los campos del saber de la geología, minería, metalurgia, química y economía minera.

Por lo tanto, la presente investigación se realizó con una visión holística en donde se tomó conocimientos de: Geología, para entender que es lo que tengo y en qué condiciones encuentro al mineral; Mineralogía, en que forma y característica tengo el mineral; Minería, cómo fue extraída y que grado de dilución tiene; Metalurgia; el cual responde a la pregunta cuánto puedo recuperar de lo que se entrega a procesar; Química, relacionada con la termodinámica, es decir sí las reacciones de los proceso ocurre o no, tanto en procesos geológicos, mineralógicos y metalúrgicos; Gestión, pues en una organización uno de los recursos más valiosos es el capital humano, pero también los recursos y reservas. Por lo que, se tuvo que hacer puentes entre las distintas áreas, ya sea las que están involucradas de manera directa o indirecta.

5.5 Aprendizaje profesional y personal

La presente Tesis, es un resumen de una gran experiencia, que me permitió aplicar los conocimientos de geología, mineralogía, minería, metalurgia, química y gestión minera, así como entender el NEGOCIO MINERO. Es decir, con cada visita de campo a las labores de Cateo Libre (CL), pude involucrarme con la naturaleza y al tener una picota, GPS, lupa de geólogo, libreta de apuntes y apoyo del geólogo de campo, tuve que combinar la teoría y el uso de los sentidos para visualizar la realidad, la cual no necesariamente está como lo dice los libros. Asimismo, durante la extracción del mineral, el grado de minuciosidad de algunos mineros artesanales por querer entregar un mineral que tenga una ley de oro mayor a 7 g/ton, ya que si no lo supera no será retribuido su trabajo, esto es por mutuo acuerdo. Razón por la cual, el grado de dilución de estos minerales es bajo. En planta de Beneficio, la experiencia de ver cómo estos minerales observados en sus estados naturales son procesadas, las cuales uno al verlas llegar en los camiones mineros observa las diferentes coloraciones que se visualizaba. Por lo que, en cada lote o camión entregado se podía ver el esfuerzo que se tuvo que hacer para llegar a extraer dicho mineral. Fue entonces que, surgió la curiosidad de que sí el color del mineral guardaba alguna información que podría proporcionarnos. Para esta experiencia, se requirió de conocimientos de estadística y muestreo de minerales acorde a diferentes protocolos de muestreo, ya que esto me permite asignar un grado de confiabilidad. Química termodinámica para ver si las condiciones operacionales favorecen o no a la reacción. Todo lo anterior, se realizó para que el proceso del mineral proveniente de las labores de cateo libre sea eficaz para luego tener una eficiencia y terminar con la suficiencia. Terminando diciendo que, el color del mineral es una determinación, determinada por la geología y determinante para su beneficio mineral.

REFERENCIAS

- A. Betejtin. (1970). Formación de los minerales en la naturaleza. En A. Betejtin, *Curso de Mineralogía* (Segunda ed., págs. 112 - 146). Moscu, Rusia: MIR.
- A. Betejtin. (1970). Propiedades de los Minerales. En A. Betejtin, *Curso de Mineralogía* (Segunda ed., págs. 28-97). Moscu, Rusia: MIR. Recuperado el 23 de octubre de 2017
- A. Bonis, & et al. (2017). Different shades of red: the complexity of mineralogical and physico-chemical factors influencing the colour of ceramics. (Elsevier, Ed.) *Ceramics International*, 43, 8065-8074. doi:10.1016/j.ceramint.2017.03.127
- A. Gale, & et al. (1999). Orbital tuning of Cenomanian marly chalk succession: towards a Milankovitch time-scale for the Late Cretaceous. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1815-1829.
- A. Mix, & et al. (1992). Color reflectance spectroscopy: A tool for rapid characterization of deep-sea sediments. (C. Station, Ed.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 138, 67-77. Obtenido de <http://ir.library.oregonstate.edu/concern/defaults/3r074w59b>
- Abzalov, M. (2016). Introduction to the Theory of Sampling. En M. Abzalov, *Applied Mining Geology* (págs. 119 - 134). Crawley, Australia: Springer International. Recuperado el 19 de Marzo de 2017
- Allan, G., & Woodvock, J. (2001). A REVIEW OF THE FLOTATION OF NATIVE GOLD AND ELECTRUM. *Minerals engineering*, 14(9), 931 - 962.
- Allen, T. (1990). *Particle Size Measurement* (Cuarta ed.). (C. a. Hall, Ed.) Cornwall, Netherlands: Powder Technology Series. doi:10.1007/978-94-009-0417-0
- BCRP. (24 de Marzo de 2017). Reporte de inflación. *Panorama actual y proyecciones macroeconómicas 2017 - 2018*. Lima, Lima, Perú: BCRP. Obtenido de <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-Inflacion/2017/marzo/reporte-de-inflacion-marzo-2017-presentacion.pdf>
- Bladh, K., & Et al. (2010). *Handbook of Mineralogy* (Quinta ed.). Chantilly, Virginia, USA: SMA. Recuperado el 27 de Mayo de 2017, de <http://www.handbookofmineralogy.org/>
- C. Muñoz. (2011). En C. Muñoz, *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis* (Segunda ed., págs. 92-98). Mexico, Mexico: Prentice Hall.
- C. Ore. (2006). *Caracterización y Rol de las Falla (E-W) Secantes en la Mineralización Aurífera Filoneana del batolito de Pataz, Perú*. Quebec: Universidad de Quebec en Chicoutimi.
- Chico R.J. (1988). Rock Color Chart. En Rhodes W, & Springer (Ed.), *Encyclopedia of Earth Science*. Boston: Springer. Recuperado el 28 de Julio de 2017
- Chryssoulis, S., & McMullen, J. (2016). Mineralogical Investigation of Gold Ores. En M. Adams, *Gold Ore Processing - Project Development and Operations* (págs. 68 - 93). Amsterdam: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-63658-4.00005-0
- CIA_PODEROSA. (Enero - Mayo de 2016). Historia de Crecimiento. *El Batolito*(44), 15.

- CIA_Poderosa. (2016). *Memoria Anual 2015*. Lima: Minera Poderosa.
- CIA_Poderosa. (2017). *Memoria Anual 2016*. Lima.
- Cochrane, S. (Marzo de 2014). The Munsell Color System: A scientific compromise from the world of art. (Elsevier, Ed.) *Studies in History and Philosophy of Science*, 26-41. doi:10.1016/j.shpsa.2014.03.004
- Contreras, R. (2007). *El origen del color en la naturaleza. Una introducción a la química del color* (Primera ed.). Merida, Venezuela: Universidad de Los Andes. Recuperado el 19 de Julio de 2017
- D. Burga. (2011). *Diccionario geológico* (Tercera ed.). Lima, Perú: INGEMMET. Recuperado el 28 de Julio de 2017
- D. Farris. (1990). *Dictionary of Geology*. New York: Harper Collins.
- D. Franzmeier. (1988). Relation of organic carbon content to texture and color of Indiana soils. *Proceedings Indiana Academy of Science*, 98, 463-471.
- D. Kemp. (2014). Colorimetric characterisation of flatbed scanners for rocks/sediment imaging. *Computers & Geosciences*, 69-74. doi:10.1016/j.cageo.2014.03.002
- D. Kemp, & A. Coe. (2007). A nonmarine record of eccentricity forcing through the Upper Triassic of southwest England and its correlation with the Newark Basin astronomically calibrated geomagnetic polarity time scale from North America. *The Geological Society of America*, 35, 991-994.
- D. Post, & et al. (1993). Correlations Between Field and Laboratory Measurements of Soil Color. (J. Bigham, & E. Ciolkosz, Edits.) *Soil Science Society of America*, 35-49. doi:10.2136/sssaspecpub31.c3
- D. Schreiber. (1989). Zur Genese von Goldquarzgängen der Pataz-Región im Rahmen der geologischen Entwicklung der Ostkordillere Nordperus. *Heidelberger Geowiss*, 19, 235.
- D. Schreiber et al. (1990). The formation of auriferous quartz-sulfide veins in the Pataz region, northern Peru: A synthesis of geological, mineralogical, and geochemical data. *Mineral Deposita*, 136 - 140. doi:10.1007/BF00205260
- D. Schulze, & et al. (1993). Significance of organic matter in determining soil colors. *Soil Science Society of America*, 31, 71-90. doi:10.2136/sssaspecpub31.c5
- E. Hurtado, & F. Rivera. (2006). El requerimiento epistemológico en las tesis de post grado. *Gestión en el tercer milenio*, 9(17), 103-105.
- E. Murand, & P. Rojik. (2003). Iron-rich precipitates in a mine drainage environment: Influence of pH on mineralogy. *American Mineralogist*, 1915-1918. doi:10.2138/am-2003-11-1234
- E. Tarbuck et al. (2005). *Ciencias de la tierra* (Octava ed.). (M. M. Romo, Ed.) Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
- Haeberlin_Yves. (2004). Carboniferous Orogenic Gold Deposits at Pataz, Eastern Andean Cordillera, Peru: Geological and Structural Framework, Paragenesis Alteracion, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology. (U. d. Ginebra, Ed.) *Economic Geology*, 99(1), 73-112. Obtenido de <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:21636>

- Harris, D. (3 de July de 1990). Fundamental aspect of gold Deposits - The Mineralogy of Gold and its relevance to gold recovery. (M. Deposita, Ed.) *Geological Survey of Canada*(25), S3 - S7.
- Havlik, T. (2008). *Hidrometallurgy - Principles and application*. Cambridge, England: Woohead Publishing. Recuperado el 10 de Febrero de 2017
- Holmes, R. (2016). Sampling Procedures. En M. Adams, *Gold Ore Processing* (págs. 45 - 56). Melbourne, Australia: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-63658-4.00004-9
- J. Aubouin et al. (1981). *Tratado de geología - Paleontología, estratigrafía*. (Omega, Ed.) Barcelona, España: Omega.
- J. Bigham, & E. Murand. (1997). Mineralogy of ochre deposits formed by the oxidation of iron sulfide minerals. *Soils and environment*, 30, 193-225.
- J. Torrent, & V. Barron. (1993). Laboratory Measurement of Soil Color: Theory and Practice. (J. Bigham, & E. Ciolkosz, Edits.) *Soil Science Society of America*, 21-33. doi:10.2136/sssaspecpub31.c2
- J. Vidal. (1984). Generalidades sobre los minerales. En J. Vidal, *Química Inorgánica* (Novena ed., págs. 330-360). Buenos Aire, Argentina: Stella. Recuperado el 5 de Setiembre de 2017
- J. Vidal. (1984). Generalidades sobre los Minerales. En J. Vidal, *Química Inorgánica* (Novena ed., págs. 330 - 360). Buenos Aires, Argentina: Stella. Recuperado el 5 de Setiembre de 2017
- K. Evans et al. (2006). Rock-Buffering of Auriferous Fluids in Altered Rocks Associated with the Golden Mile-Style Mineralization, Kalgoorlie Gold Field, Western Australia. *Society of Economic Geology*, 101, 803 - 817. doi:10.2113/gsecongeo.101.4.805
- Khan academy. (28 de Julio de 2017). *Luz y pigmentos fotosintéticos*. (Khanacademy) Recuperado el 28 de Julio de 2018, de <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments>
- Kitaigorodski, A. (1981). *Physics for Everyone: Photons and nuclei* (Segunda ed.). Rusia: MIR Publishers. Recuperado el 28 de Julio de 2017
- Klockmann, F., & Ramdohr, P. (1947). Propiedades ópticas. En F. Klockmann, & P. Ramdohr, *Tratado de Mineralogía* (Segunda ed.). Aquisgran, Alemania: Gili. Recuperado el 19 de marzo de 2017
- Klockmann, F., & Ramdohr, P. (1947). *Tratado de Mineralogía* (Segunda ed.). Aquisgran, Alemania: Gili. Recuperado el 19 de marzo de 2017
- L. Daft, R. (2011). *Teoría y diseño organizacional* (Décima ed.). Mexico DF: Cengage Learning. Recuperado el 19 de Marzo de 2017
- Lorenzen, L., & Tumilty, J. (1992). Diagnostic Leaching as an Analytical Tool For Evaluating The effect of Reagents on The Performance Of a Gold Plant. *Minerals Engineering*, V, 503 - 512. Recuperado el 28 de Julio de 2017
- M. Alfaro. (2002). *Introducción al Muestreo Minero*. Santiago, Chile: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Recuperado el 19 de Marzo de 2017
- M. Gutierrez. (2008). *Geomorfología*. (M. M. Romo, Ed.) Madrid: Prentice - Hall.

- M. Javier. (2014). *Dilution: Human error*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Utah: SME Annual Meeting. Recuperado el 1 de Agosto de 2017, de <http://www.onemine.org/document/abstract.cfm?docid=218451&title=Dilution-Human-Error>
- M. Konen, & et al. (2003). Organic carbon, texture and quantitative color measurements relationships for cultivated soils in north Central Iowa. *Soil Science Society of America*, 67, 1823-1830. doi:10.2136/sssaj2003.1823
- M. Sanchez, & et al. (2015). Soil-color changes by sulfurization induced from a pyritic surface sediment. *Catena*, 135, 173-183. doi:10.1016/j.catena.2015.07.023
- Marsden, J., & House, C. I. (2006). *The Chemistry of Gold Extracción* (Segunda ed.). (SME, Ed.) Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Ministerio de Energía y Minas. (s.f.). *Estadísticas - Producción Minera*. Obtenido de http://www.minem.gob.pe/_estadisticaSector.php?idSector=1&idCategoria=10
- Miranda_C. (1983). *Alteración y Petrología de la Veta Mercedes: Informe privado de Cia Minera Poderosa S.A.* Lima: CIA Minera Poderosa.
- Moller, P., & Kersten, G. (1994). Electrochemical accumulation of visible gold on pyrite and arsenopyrite surfaces. *Mineralium Deposita*, 29, 404 - 413. doi:10.1007/BF01886958
- Munsell Color. (2009). *Geological Rock - Color Chart*. Michigan, Estados Unidos de America: Munsell Color. Recuperado el 8 de Mayo de 2017, de http://www.vawaterwellassociation.org/wp-content/uploads/2014/05/Munsell-sample-from-the-munsell-website-CIPA00011_599.pdf
- N. Wells. (2001). Quantitative evaluation of color measurements: I. Triaxial stereoscopic scatter plots. *Sedimentary Geology*, 1-15. doi:10.1016/S0037-0738(01)00205-6
- Nassau, K. (2001). *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color* (Segunda ed.). New York: Wiley.
- Palet, A. (2002). Pigmento artístico. En A. Palet, *Tratado de pintura. Color, pigmentos y ensayo*. Barcelona, España: Universitat de Barcelona.
- Pauling, L. (1967). Naturaleza y propiedades de la materia. En L. Pauling, *Química General* (Novena ed., págs. 3-19). San Fransisco: Aguilar.
- Peréz, C. (2005). *Muestreo estadístico - Conceptos y problemas resuletos*. Madrid, España: Pearson Educación. Recuperado el 08 de Abril de 2017
- Poderosa, C. (22 de Enero de 2017). *Concesiones*. Obtenido de <http://www.poderosa.com.pe/medio-ambiente/concesiones.html?n1=medio-ambiente&n2=cat01&n3=int02>
- R. Bates and J. Jackson. (1984). *Dictionary of Geological Terms*. (R. B. Jackson, Ed.) New York: Anchor Books.
- R. Viscarra, & et al. (2009). In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 150, 253-266. doi:10.1016/j.geoderma.2009.01.025
- R.A. Viscarra, & et al. (2005). Colour space models for soil science. *GEODERMA*, 320-337. doi:10.1016/j.geoderma.2005.07.017

- Rendu, J. (2008). *An Introduction To Cut-Off Grade Estimation*. Colorado, Estados Unidos: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Recuperado el 19 de Marzo de 2017
- S. Lohr. (2000). *Muestreo: Diseño y Análisis* (Primera ed.). Mexico DF: International Thomson. Recuperado el 27 de Junio de 2017
- S.K. Haldar. (2014). Basic Petrology. En S. Haldar, & B. Library (Ed.), *Introduction To Mineralogy And Petrology* (págs. 81 - 91). Oxford, Uk: Elsevier.
- Saba, M., Mohammad, A., Rashchi, F., & Moghaddam, J. (22 de Octubre de 2011). Diagnostic pre-treatment procedure for simultaneous cyanide leaching of gold and silver from a refractory gold/silver ore. *Minerals Engineering*(24), 1703 - 1709. doi:10.1016/j.mineng.2011.09.013
- Schreiber_et.al. (1990). Geologic Setting, Paragenesis, and Physicochemistry of Gold Quartz Veins Hosted by Plutonic Rocks in the Pataz Region. *Economic Geology*, 85, 1328 - 1347. Recuperado el 14 de Abril de 2017
- Sinclair, A., & Blackwell, G. (2002). *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambrigde, UK: Cambrigde. Recuperado el 19 de Marzo de 2017
- T. Matthews. (2015). *Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Denver: SME Annual Meeting. Recuperado el 28 de Julio de 2017, de <http://www.onemine.org/document/abstract.cfm?docid=224705>
- Tomkins, A. G. (2013). On the source of orogenic gold. *Geological Society of America*, 1255 - 1256. doi:10.1130/focus122013.1
- TREADWELL, F. (1947). *Tratado de Química Analítica*. Zurich, Alemania: Martí. Recuperado el 8 de Mayo de 2017
- United States Department of Agriculture. (2012). Engineering Classification of Rock Materials. En U. USDA, *Geology Natinal Engineering Handbook* (págs. 1 - 35). USA: Natural Resources Conservation Service. Recuperado el 5 de Setiembre de 2017, de <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=31848.wba>
- V. Spiridonov, & et al. (1973). Algunas distribuciones de magnitudes aleatorias. En V. Spiridonov, & e. al, *Tratamiento matemático de datos físico químicos* (págs. 35 - 42). Moscu, Rusia: MIR.
- Vargas Gallardo, J. (1990). *Metalurgia del Oro y Plata* (Segunda ed.). Lima, Perú: San Marcos. Recuperado el 19 de Marzo de 2017
- W. Balsama, & et al. (1999). Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores. *Marine Geology*, 161, 141-153. doi:10.1016/S0025-3227(99)00037-7
- W. Maresh. (1990). *Rocas*. Barcelona: Blume.
- W. Witt et al. (2016). Multiple Gold Mineralizing Styles in The Northern Pataz District, Perú. *Economy Geology*, 111(2), 355 -394.
- Y. Haeberlin et al. (2004). Carboniferous Orogenic Gold Deposits at Pataz, Eastern Andean Cordillera, Peru: Geological and Structural Framework, Paragenesis

Alteracion, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology. *Economic Geology*, 99(1), 73 - 112.
Obtenido de <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:21636>

Young, G. (1961). *Elementos de Minería* (Segunda ed.). Barcelona, España: Gili.
Recuperado el 19 de Marzo de 2017

ANEXOS

ANEXO 1:

MUESTRAS DE

INVESTIGACIÓN

ANEXO 2:

TABLAS

MUNSELL PARA

ROCAS

5R 8/2 Grayish Pink	5R 7/4 Moderate Pink	5R 6/2 Pale Red	5R 6/6 Light Red	5R 5/4 Moderate Red	5R 4/2 Grayish Red
5R 4/6 Moderate Red	5R 3/4 Dusky Red	5R 2/2 Blackish Red	5R 2/6 Very Dark Red	10R 8/2 Grayish Orange Pink	10R 7/4 Moderate Orange Pink
10R 6/2 Pale Red	10R 6/6 Moderate Reddish Orange	10R 5/4 Pale Reddish Brown	10R 4/2 Grayish Red	10R 4/6 Moderate Reddish Brown	10R 3/4 Dark Reddish Brown
10R 2/2 Very Dusky Red	5Y 8/4 Moderate Orange Pink	5YR 7/2 Grayish Orange Pink	5YR 6/4 Light Brown	5YR 5/2 Pale Brown	5YR 5/6 Light Brown
5YR 4/4 Moderate Brown	5Y 3/2 Grayish Brown	5YR 3/4 Moderate Brown	5YR 2/2 Dusky Brown	10YR 8/2 Very Pale Orange	10YR 8/6 Pale Yellowish Orange
10YR 7/4 Grayish Orange	10YR 6/2 Pale Yellowish Brown	10YR 6/6 Dark Yellowish Orange	10YR 5/4 Moderate Yellowish Brown	10YR 4/2 Dark Yellowish Brown	10YR 2/2 Dusky Yellowish Brown
5Y 8/4 Grayish Yellow	5Y 7/2 Yellowish Gray	5Y 7/6 Moderate Yellow	5Y 6/4 Dusky Yellow	5Y 5/2 Light Olive Gray	5Y 5/6 Light Olive Brown

Munsell Color

Rock-Color Chart 2009 Revision

5Y 4/4 Moderate Olive Brown	5Y 3/2 Olive Gray	10Y 8/2 Pale Greenish Yellow	10Y 7/4 Moderate Greenish Yellow	10Y 6/2 Pale Olive	10Y 6/6 Dark Greenish Yellow
10Y 5/4 Light Olive	10Y 4/2 Grayish Olive	5GY 7/2 Grayish Yellow Green	5GY 7/4 Moderate Yellow Green	5GY 5/2 Dusky Yellow Green	5GY 3/2 Grayish Olive Green
10GY 7/2 Pale Yellowish Green	10GY 6/4 Moderate Yellowish Green	10GY 5/2 Grayish Green	10GY 4/4 Dark Yellowish Green	10GY 3/2 Dusky Yellowish Green	
5G 7/2 Pale Green	5G 7/4 Light Green	5G 6/6 Brilliant Green	5G 5/2 Moderate Yellow Green	5G 5/6 Moderate Green	5G 3/2 Dusky Green
10G 8/2 Very Pale Green	10G 6/2 Pale Green	10G 4/2 Grayish Green	5BG 7/2 Pale Blue Green	5BG 6/6 Light Blue Green	5BG 5/2 Grayish Blue Green
5BG 4/6 Moderate Blue Green	5BG 3/2 Dusky Blue Green	5B 8/2 Very Pale Blue	5B 7/6 Light Blue	5B 6/2 Pale Blue	5B 5/6 Moderate Blue
5PB 7/2 Pale Blue	5PB 5/2 Grayish Blue	5PB 3/2 Dusky Blue	5P 6/2 Pale Purple	5P 4/2 Grayish Purple	5P 2/2 Very Dusky Purple

Munsell Color

Rock-Color Chart 2009 Revision

5RP 8/2 Pale Pink	5RP 6/2 Pale Red Purple	5RP 4/2 Grayish Red Purple	5RP 2/2 Very Dusky Purple		
5B 9/1 Bluish White	5G 8/1 Light Greenish Gray	5GY 8/1 Light Greenish Gray	5Y 8/1 Yellowish Gray	5YR 8/1 Pinkish Gray	5B 7/1 Light Bluish Gray
5YR 6/1 Light Brownish Gray	5Y 6/1 Light Olive Gray	5G 6/1 Greenish Gray	5GY 6/1 Greenish Gray	5B 5/1 Medium Bluish Gray	5G 4/1 Dark Greenish Gray
5GY 4/1 Dark Greenish Gray	5Y 4/1 Olive Gray	5YR 4/1 Brownish Gray	5G 2/1 Greenish Black	5GY 2/1 Greenish Black	5Y 2/1 Olive Black
5YR 2/1 Brownish Black					
N9 White	N8 Very Light Gray	N7 Light Gray	N6 Medium Light Gray	N5 Medium Gray	N4 Medium Dark Gray
N3 Dark Gray	N2 Grayish Black	N1 Black			

Munsell Color

Rock-Color Chart

2009 Revision

ANEXO 3:

HANDBOOK OF

MINERALOGY

Crystal Data: Monoclinic, pseudo-orthorhombic. *Point Group:* $2/m$. Crystals, to 30 cm, flat tabular to blocky to prismatic, striated $\parallel$ [001]. Also compact, granular, columnar. *Twinning:* Common on {100} and {001}; as contact or penetration twins on {101}; on {012} to produce star-shaped trillings or cruciform twins.

Physical Properties: *Cleavage:* Distinct on {101}; {010} in traces. *Fracture:* Uneven. *Tenacity:* Brittle. Hardness = 5.5–6 VHN = 1081 on (001) section (100 g load). $D(\text{meas.}) = 6.07(15)$ $D(\text{calc.}) = 6.18$

Optical Properties: Opaque. *Color:* Silver-white to steel-gray; in polished section, white with faint yellow tint. *Luster:* Metallic. *Pleochroism:* Weak, in white or bluish tint and faint reddish yellow. *Anisotropism:* Strong, red-violet.

R_1 – R_2 : (400) 50.3–51.8, (420) 50.3–51.8, (440) 51.3–51.8, (460) 50.6–51.8, (480) 51.0–51.9, (500) 51.4–51.9, (520) 51.8–51.9, (540) 52.2–51.9, (560) 52.5–51.9, (580) 53.0–51.8, (600) 53.4–51.6, (620) 53.6–51.5, (640) 53.6–51.3, (660) 53.6–51.3, (680) 53.4–51.2, (700) 53.2–51.0

Cell Data: *Space Group:* $P2_1/c$. $a = 5.744(2)$ $b = 5.675(1)$ $c = 5.785(2)$
 $\beta = 112.17(2)^\circ$ $Z = 4$

X-ray Powder Pattern: Freiberg, Germany.

2.677 (100), 2.662 (100), 2.418 (95), 2.412 (95), 2.440 (90), 1.814 (90), 1.824 (70)

Chemistry:	(1)	(2)	(3)
Fe	34.53	32.48	34.30
Co	0.09	1.16	
Bi	0.79		
As	44.34	48.72	46.01
S	20.22	18.80	19.69
Total	99.97	101.16	100.00

(1) O'Brien mine, Cobalt, Canada. (2) Franklin, New Jersey, USA. (3) FeAsS.

Mineral Group: Arsenopyrite group.

Occurrence: Of hydrothermal origin, typically one of the earliest minerals to form. Found in pegmatites, high-temperature gold-quartz and tin veins, and in contact metamorphic sulfide deposits; less commonly of low-temperature hydrothermal origin. Also in gneisses, schists and other metamorphic rocks.

Association: Pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite, galena, gold, scheelite, cassiterite, many other species.

Distribution: The most abundant and widespread arsenic mineral; only a few localities for large and fine crystals can be mentioned. In Germany, from Altenberg, Ehrenfriedersdorf, and Freiberg, Saxony. In the Stari Trg mine, Trepča, Serbia. From Panasqueira, Portugal. At Sala, Tunaberg, Stollberg, Boliden, and Nordmark, Sweden. From Stratonik, Greece. In England, from a number of mines in Cornwall, and in Devonshire, at Tavistock. In the USA, from Franconia, Grafton Co., New Hampshire and Franklin, Sussex Co., New Jersey. From Hidalgo del Parral and Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico. In Canada, in the Cobalt district, Ontario. In Japan, large crystals in the Obira mine, Bungo, Oita Prefecture; the Ashio mine, Tochigi Prefecture; and many other localities.

Name: A contraction of *arsenical pyrites*.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 316–322. (2) Fuess, H., T. Kratz, J. Töpel-Schadt, and G. Miehe (1987) Crystal structure refinement and electron microscopy of arsenopyrite. *Zeits. Krist.*, 179, 335–346. (3) Morimoto, N. and L.A. Clark (1961) Arsenopyrite crystal-chemical relations. *Amer. Mineral.*, 46, 1448–1469. (4) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 23.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Tetragonal. *Point Group:* $\bar{4}2m$. Equant, tetrahedral-shaped crystals, may be modified by scalenohedral faces, to as large as 10 cm. Sphenoidal faces {112} typically large, dull in luster and striated $\parallel [1\bar{1}0]$; { $\bar{1}12$ } faces are small and bright. Commonly massive, compact; can be botryoidal. *Twining:* Twin plane {112}, composition surface commonly {112}; twin plane {012}; also by rotation about [001] with composition plane {110}, producing penetration twins.

Physical Properties: *Cleavage:* Poor on {011} and {111}. Hardness = 3.5–4
VHN = 187–203 (basal section); 181–192 (vertical section) (100 g load). D(meas.) = 4.1–4.3
D(calc.) = 4.283

Optical Properties: Opaque. *Color:* Brass-yellow, may be tarnished and iridescent.
Streak: Greenish black. *Luster:* Metallic. *Anisotropism:* Weak.
R₁–R₂: (400) 16.0–17.3, (420) 20.0–21.3, (440) 24.8–26.1, (460) 30.2–31.4, (480) 34.9–35.9, (500) 38.9–39.9, (520) 41.9–42.7, (540) 44.0–44.9, (560) 45.4–46.4, (580) 46.6–47.6, (600) 47.1–48.3, (620) 47.5–48.6, (640) 47.6–48.7, (660) 47.6–48.7, (680) 47.6–48.6, (700) 47.6–48.6

Cell Data: *Space Group:* $I\bar{4}2d$. $a = 5.281$ $c = 10.401$ $Z = 4$

X-ray Powder Pattern: Merkur mine, Ems, Hesse, Germany.
3.038 (100), 1.8570 (35), 1.5927 (27), 1.8697 (22), 1.5753 (14), 2.644 (5), 1.2025 (5)

Chemistry:	(1)	(2)
Cu	35.03	34.63
Fe	31.00	30.43
S	34.96	34.94
Total	100.99	100.00

(1) Western mines, Vancouver Island, British Columbia, Canada; by electron microprobe, leading to Cu_{1.01}Fe_{1.01}S_{2.00}. (2) CuFeS₂.

Polymorphism & Series: Forms a series with eskebornite.

Mineral Group: Chalcopyrite group.

Occurrence: A primary mineral in hydrothermal veins, stockworks, disseminations, and massive replacements; an exsolution product in mafic igneous rocks; of sedimentary origin controlled by redox conditions.

Association: Sphalerite, galena, tetrahedrite, pyrite, many copper sulfides.

Distribution: A very common copper mineral, so only a few outstanding localities can be mentioned. In the USA an important ore mineral at many of the copper mines of Arizona, as at Bisbee, Cochise Co.; large crystals from the Groundhog mine, Vanadium, Grant Co., New Mexico; in crystals from New York, at the Rossie lead mines, St. Lawrence Co.; at French Creek, Chester Co., Pennsylvania; in Missouri, at Joplin, Jasper Co. From Cananea, Sonora, Mexico. At Huaron, Peru. In Canada, in the Rouyn district, Quebec, at the Noranda mine; from Ontario, in the Kidd Creek mine, near Timmins, and at Sudbury. In Slovakia, at Baňská Štiavnica (Schemnitz). In the Czech Republic, at Horní Slavkov (Schlaggenwald). From Freiberg, Saxony; Dillenburg, Hesse; in the Georg mine, near Horhausen, Westerwald; and a number of mines in North Rhine-Westphalia, Germany. At Vinsknoes, Karmoen, Norway. From the Ani and Arakawa mines, Akita Prefecture, Japan. Large crystals in the Nababiep mine, Cape Province, South Africa.

Name: From the Greek for *brass* and *pyrite*.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 219–224. (2) Hall, S.R. and J.M. Stewart (1973) The crystal structure refinement of chalcopyrite, CuFeS₂. Acta Cryst., 29, 579–585. (3) (1985) NBS Mono. 25, 21, 69. (4) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 84.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Cubic. *Point Group:* $\bar{4}3m$. Tetrahedral crystals, to 3.5 cm; massive and as inclusions in other sulfides.

Physical Properties: Hardness = n.d. VHN = 263–340 (100 g load). D(meas.) = n.d. D(calc.) = [5.41]

Optical Properties: Opaque. *Color:* Gray to black.

R: (400) 34.1, (420) 34.0, (440) 33.9, (460) 33.7, (480) 33.6, (500) 33.5, (520) 33.3, (540) 33.1, (560) 32.7, (580) 32.2, (600) 31.5, (620) 31.0, (640) 30.4, (660) 30.0, (680) 29.5, (700) 29.0

Cell Data: *Space Group:* $I\bar{4}3m$. $a = 10.474\text{--}10.560$ $Z = 2$

X-ray Powder Pattern: n.d.

Chemistry:	(1)	(2)	(1)	(2)
Ag	36.0	48.9	Sb	25.1
Cu	12.4	3.2	As	0.5
Fe	4.1	0.2	Bi	0.1
Zn	0.6	6.1	S	21.8
Hg		0.1		19.9
			Total	100.5
				100.1

(1) Mt. Isa, Australia; by electron microprobe, corresponding to $(\text{Ag}_{6.37}\text{Cu}_{3.72}\text{Fe}_{1.41}\text{Zn}_{0.18})_{\Sigma=11.68}(\text{Sb}_{3.95}\text{As}_{0.13})_{\Sigma=4.08}\text{S}_{13.00}$. (2) Knappenstube mine, Austria; by electron microprobe, average of analyses on 14 samples; corresponding to $(\text{Ag}_{9.50}\text{Zn}_{1.95}\text{Cu}_{1.06}\text{Fe}_{0.08}\text{Hg}_{0.01})_{\Sigma=12.60}(\text{Sb}_{3.61}\text{As}_{0.17}\text{Bi}_{0.01})_{\Sigma=3.79}\text{S}_{13.00}$.

Polymorphism & Series: Forms a series with tetrahedrite and argentotennantite.

Mineral Group: Tetrahedrite group.

Occurrence: In hydrothermal deposits.

Association: A wide variety of sulfides and sulfosalts, as for tetrahedrite.

Distribution: In Germany, in Saxony, from the Freiberg district [TL], as in the Himmelsfürst mine, Erbsdorf, near Freiberg. From Kutná Hora and the Zlaté Hory district, Czech Republic. In Austria, from the Knappenstube mine, Hochtor, Salzburg. From Yukhondzha, Sakha, Russia. At Slädekärr and in the Vena mines, near Askersund, Örebro, Sweden. From the Bleikvassli Zn–Pb–Cu deposit, Nordland, Norway. In Scotland, at Tyndrum, Perthshire. In the Hi-Ho mine, Cobalt–Gowganda region, Ontario; and the Keno Hill–Galena Hill area, Yukon Territory, Canada. Large crystals from the San José mine, Oruro, Bolivia. In Japan, in the Inakuraishi, Koryu, and Sanru mines, Hokkaido. In Australia, at Mt. Isa and the Cannington Ag–Pb–Zn deposit, Queensland; and in the Meerschaum mine, north of Omeo, Victoria. Additional localities are known.

Name: For the long-known occurrence of silver-rich tetrahedrite at Freiberg, Germany.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 374–384 (tetrahedrite–tennantite). (2) Riley, J.F. (1974) The tetrahedrite–freibergite series with reference to the Mount Isa Pb–Zn–Ag orebody. *Mineralium Deposita*, 9, 117–124. (3) Peterson, R.C. and I. Miller (1986) Crystal structure and cation distribution in freibergite and tetrahedrite. *Mineral. Mag.*, 50, 717–721. (4) Paar, W.H., T.T. Chen, and W. Guenther. (1978) Extremely silver-rich freibergite in lead-zinc-copper ores of the “Knappenstube” mine, Hochtor, Salzburg. *Carinthia* 2, 88, 35–42. (5) (1980) *Chem. Abs.*, 93, 189277 (abs. ref. 5). (6) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 177.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Cubic. *Point Group:* $4/m\bar{3}2/m$. Most commonly cubic, crystals to a meter on an edge are known; more rarely cubo-octahedral or octahedral. May be tabular on {001}; also forms reticulated masses and skeletal crystals. As cleavable masses, coarse to very fine granular; fibrous, plumose. *Twinning:* Twin plane {111}, as both contact and penetration twins; twin plane {114}, lamellar.

Physical Properties: *Cleavage:* Perfect on {001}; parting or cleavage on {111}. *Fracture:* Subconchoidal. *Tenacity:* Brittle. Hardness = 2.5–2.75 VHN = 79–104 (100 g load). D(meas.) = 7.58 D(calc.) = 7.57

Optical Properties: Opaque. *Color:* Lead-gray; in polished section, white. *Streak:* Lead-gray. *Luster:* Metallic.

R: (400) 51.9, (420) 50.5, (440) 49.1, (460) 47.7, (480) 46.6, (500) 45.4, (520) 44.4, (540) 43.7, (560) 43.1, (580) 42.8, (600) 42.7, (620) 42.7, (640) 42.8, (660) 42.9, (680) 42.9, (700) 42.6

Cell Data: *Space Group:* $Fm\bar{3}m$. $a = 5.936$ $Z = 4$

X-ray Powder Pattern: Synthetic.

2.969 (100), 3.429 (84), 2.099 (57), 1.790 (35), 1.327 (17), 1.714 (16), 1.484 (10)

Chemistry:

	(1)	(2)	(3)
Pb	86.50	85.9	86.60
Cu	0.07	trace	
Sb		0.7	
Bi		0.2	
S	13.31	12.6	13.40
Total	99.88	99.4	100.00

(1) Katanga Province, Congo (Shaba Province, Zaire); Cu assumed present in covellite and S equivalent deducted. (2) Barrow mine, Newlands, Cumbria, England; by electron microprobe. (3) PbS.

Polymorphism & Series: Forms a series with clausthalite.

Occurrence: In many different types of environments. In hydrothermal veins, formed under a wide range of temperatures; in contact metamorphic deposits, in pegmatites, rarely; limestones and dolostones are common host rocks.

Association: Sphalerite, marcasite, pyrite, chalcopyrite, tetrahedrite, silver minerals, siderite, calcite, dolomite, barite, quartz, many other hydrothermal minerals.

Distribution: The most important ore mineral of lead; only a few deposits of note can be mentioned. In the USA, in Idaho, in the Coeur d'Alene district, Shoshone Co.; in Colorado, at Leadville, Lake Co., and from Breckenridge, Summit Co. In the Mississippi Valley region, in the Tri-State district, at Joplin, Jasper Co., Missouri; Galena, Cherokee Co., Kansas; and Picher, Ottawa Co., Oklahoma. At the Miliken (Sweetwater) mine, Reynolds Co., Missouri, and other mines north along the Viburnum Trend district, brilliant crystals. From Příbram, Czech Republic. At Freiberg, Saxony; from near Bad Ems, Hesse; and at St. Andreasberg, Neudorf, and Clausthal, in the Harz Mountains, Germany. In France, from Pontgibaud, Puy-de-Dôme. In England, at Alston Moor, Cumbria. In Scotland, at Wanlockhead, Dumfries. In Ireland, from the Mogul mine, Silvermines, Co. Tipperary. At Naica and Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico.

Name: A Latin word *galena*, given to lead ore or the dross from melted lead.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 200–204. (2) Deer, W.A., R.A. Howie, and J. Zussman (1962) Rock-forming minerals, v. 5, non-silicates, 180–185. (3) Ramsdell, L.S. (1925) The crystal structures of some metallic sulfides. Amer. Mineral., 10, 281–???. (4) (1953) NBS Circ. 539, 2, 18. (5) Ramdohr, P. (1969) The ore minerals and their intergrowths, (3rd edition), 635–649. (6) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 185.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Cubic. *Point Group:* $4/m\bar{3}2/m$. As octahedra, dodecahedra, and cubes, typically crude or rounded, to about 5 cm; also elongated $\parallel$ [111]. In twinned and parallel crystal groups; reticulated, dendritic, arborescent, platy, filiform, spongy; massive, and in rounded nuggets; scales and flakes. *Twining:* Common on {111}; repeated to form reticulated and dendritic aggregates.

Physical Properties: *Fracture:* Hackly. *Tenacity:* Very malleable and ductile. Hardness = 2.5–3 VHN = 30–34, 44–58 (argentian) (10 g load). D(meas.) = 19.3 D(calc.) = 19.302

Optical Properties: Opaque in all but thinnest foils. *Color:* Gold-yellow with a reddish tint when pure, silver-white to copper-red when impure; blue and green in transmitted light. *Luster:* Metallic.

R: (400) 36.8, (420) 36.8, (440) 36.4, (460) 36.1, (480) 36.7, (500) 45.3, (520) 62.5, (540) 75.0, (560) 82.2, (580) 86.8, (600) 89.7, (620) 91.9, (640) 93.3, (660) 94.1, (680) 94.8, (700) 95.3

Cell Data: *Space Group:* $Fm\bar{3}m$. $a = 4.0786$ $Z = 4$

X-ray Powder Pattern: Synthetic.

2.355 (100), 2.039 (52), 1.230 (36), 1.442 (32), 0.9357 (23), 0.8325 (23), 0.9120 (22)

Chemistry:

	(1)		(1)
Au	99.6	Ag	0.1
Cu	0.1	Total	99.8

(1) Porthcurnick Beach, Cornwall, England; by electron microprobe. Commonly contains Ag, Cu, Fe; rarely Pb, Ti, Sb, Hg, V, Bi, Mn, As, Sn, Zn, Pd, Pt, Cd, many other elements.

Polymorphism & Series: Forms a series with silver.

Occurrence: Widespread in very small quantities in rocks of many kinds throughout the world, and in sea water. In veins of epithermal origin, typically in quartz with pyrite and other sulfides, and with tellurides; in pegmatites; in contact metamorphic deposits. Common in placers.

Association: Pyrite, chalcopyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, sylvanite, krennerite, calaverite, altaite, tetradymite, scheelite, ankerite, tourmaline, quartz.

Distribution: Many localities for fine specimens. In Russia, in Siberia, along the eastern slope of the Ural Mountains; important localities near Yekaterinburg (Sverdlovsk), as at Beresovsk; in the Miass district; large crystal groups from along the Lena River, Sakha. Sharply crystallized from Romania, at Roșia Montană (Verespatak) and Săcărâmb (Nagyág). In Australia, many occurrences, as at Bendigo, Ballarat, and Matlock, Victoria; along the Palmer River and at Gympie, Queensland; from Kalgoorlie, Western Australia, with gold telluride ores, also very large alluvial nuggets. At the Porgera mine, Mt. Kare, Papua New Guinea. The world's most important gold district is the Witwatersrand, Transvaal, South Africa, which, however, only rarely produces crystalline material. In Canada, especially in Ontario, in the Porcupine and Hemlo districts. In the USA, in California, in the Mother Lode belt of the Sierra Nevada, with fine examples from both lode and placer deposits. In South Dakota, from the Homestake mine at Lead, Lawrence Co.; in Colorado, wire and leaf gold from Breckenridge, Summit Co.; in Lake Co., at Leadville; in Alaska, in lode mines in the Juneau district and placers along the Yukon River. Near Santa Elena, in the Grand Savannah River region, Venezuela, a placer producing exceptional skeletal crystals. A bonanza gold rush occurred at Serra Pelada, Pará, Brazil.

Name: An Old English word for the metal; perhaps related to the Sanskrit *jval*; chemical symbol from the Latin *aurum*, *shining dawn*.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 90–95. (2) Jones, R.S. and M. Fleischer (1969) Gold in minerals and the composition of native gold. U.S. Geol. Surv. Circ. 612, 17 pp. (3) Ewald, P.P. and C. Hermann, Eds. (1931) Gold, *Au*. Strukturbereich, 1, 38–40 (in German). (3) (1953) NBS Circ. 539, 1, 33. (4) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 204.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Monoclinic. *Point Group:* 2/*m*. Crystals elongated || [001], acicular and fibrous, to 10 cm; striated || [001]; rarely in rings and spheres. As feltlike masses; massive, columnar, also radial and plumose. *Twinning:* On {100}; lamellae very commonly observed in polished section.

Physical Properties: *Cleavage:* Good on {001}; reported on {010} and {120}. *Tenacity:* Brittle. Hardness = 2.5 VHN = 66–86 (100 g load). D(meas.) = 5.63 D(calc.) = 5.76

Optical Properties: Opaque. *Color:* Gray-black, may tarnish iridescent; in polished section, gray-black. *Luster:* Metallic. *Pleochroism:* Distinct. *Anisotropism:* Strong. R₁–R₂: (400) 38.4–45.1, (420) 38.1–44.9, (440) 37.7–44.8, (460) 37.6–45.0, (480) 37.4–45.1, (500) 37.3–45.0, (520) 37.0–44.7, (540) 36.6–44.3, (560) 36.1–43.8, (580) 35.7–43.2, (600) 35.3–42.6, (620) 34.8–41.9, (640) 34.2–41.0, (660) 33.6–40.1, (680) 33.0–39.2, (700) 32.5–38.5

Cell Data: *Space Group:* P2₁/*a*. *a* = 15.57 *b* = 18.98 *c* = 4.03 β = 91°48' *Z* = 2

X-ray Powder Pattern: Itos mine, Oruro, Bolivia. 3.44 (100), 2.84 (90), 2.75 (80), 3.18 (50), 3.09 (50), 2.06 (50), 3.87 (40)

Chemistry:	(1)	(2)	(3)
Pb	40.14	42.2	40.15
Fe	2.64	2.5	2.71
Cu	0.18		
Sb	34.25	35.3	35.39
S	22.34	20.5	21.75
Total	99.55	100.5	100.00

(1) Cornwall, England; average of three analyses. (2) Tresungers mine, St. Endellion, England; by electron microprobe. (3) Pb₄FeSb₆S₁₄.

Polymorphism & Series: Dimorphous with parajamesonite; forms a series with benavidesite.

Occurrence: Typically a late-stage hydrothermal mineral in Pb–Ag–Zn veins formed at low to medium temperatures.

Association: Other lead sulfosalts, pyrite, sphalerite, galena, tetrahedrite, stibnite, quartz, siderite, calcite, dolomite, rhodochrosite.

Distribution: From numerous localities, but only a few have provided rich material. From Cornwall, England, around St. Endellion [TL] and St. Kew. In Germany, at Freiberg, Saxony; and near Magdesprung, Selke Valley, and Clausthal, Harz Mountains. From Příbram, Czech Republic. At Aranyidka, Baia Sprie (Felsőbánya), and Herja (Kisbánya), Baia Mare (Nagybánya) district, Romania. From Trepča, Serbia. At Sala, Västmanland, Sweden. From Machacamarcá, Poopó, and Huanuni, Oruro, Bolivia. In Mexico, from the Noche Buena mine, near Mazapil; the Santa Rita mine, Nieves; and in relatively thick crystals from the Noria mine, near Sombrerete, Zacatecas. In the USA, in Idaho, at Slate Creek, Shoshone Co. From the Dachang district, Guangxi Autonomous Region, China.

Name: In honor of Robert Jameson (1774–1854), Scottish mineralogist, Edinburgh, Scotland, who first described the mineral.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 451–455. (2) Niizeki, N. and M.J. Buerger (1957) The crystal structure of jamesonite, FePb₄Sb₆S₁₄. Zeits. Krist., 109, 161–183. (3) L.L.Y. Chang, X. Li, and C. Zheng (1987) The jamesonite – benavidesite series. Can. Mineral., 25, 667–672. (4) Berry, L.G. and R.M. Thompson (1962) X-ray powder data for the ore minerals. Geol. Soc. Amer. Mem. 85, 150. (5) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 267.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Orthorhombic. *Point Group:* $2/m\ 2/m\ 2/m$. Crystals typically tabular on {010}, also pyramidal, prismatic, and, rarely, capillary; curved faces common. Stalactitic, reniform, fine-granular massive; cockscomb and spearhead shapes due to twinning on {101}. *Twinning:* Common and repeated on {101}; less common on {011}. Intense twin lamellae development observed in polished section.

Physical Properties: *Cleavage:* {101}, rather distinct; {110} in traces. *Tenacity:* Brittle. Hardness = 6–6.5 VHN = 915–1099 (200 g load). $D(\text{meas.}) = 4.887$ $D(\text{calc.}) = 4.875$

Optical Properties: Opaque. *Color:* Tin-white on fresh surface, pale bronze-yellow, darkening on exposure, iridescent tarnish. *Streak:* Grayish or brownish black. *Luster:* Metallic. *Pleochroism:* [100] creamy white; [010] light yellowish white; [001] white with rose-brown tint. *Anisotropism:* Very strong, yellow through pale green to dark green. R_1 – R_2 : (400) 40.4–44.5, (420) 41.9–45.4, (440) 43.4–47.3, (460) 44.3–50.1, (480) 45.2–52.8, (500) 46.3–54.8, (520) 47.7–56.1, (540) 48.9–56.3, (560) 49.5–55.9, (580) 49.6–55.2, (600) 49.5–54.8, (620) 49.2–58.4, (640) 48.7–53.8, (660) 47.9–52.9, (680) 47.2–51.9, (700) 46.6–51.2

Cell Data: *Space Group:* $Pn\bar{m}$. $a = 4.436$ $b = 5.414$ $c = 3.381$ $Z = 2$

X-ray Powder Pattern: Webb City, Missouri, USA.

2.70 (100), 1.755 (90), 3.43 (60), 2.41 (60), 2.32 (60), 1.911 (50), 1.094 (50)

Chemistry:

	(1)	(2)	(3)
Fe	46.53	46.55	46.55
Cu	trace		
As		trace	
S	53.30	53.05	53.45
rem.	0.20		
Total	100.03	99.60	100.00

(1) Joplin, Missouri, USA; remainder is SiO₂. (2) Jasper, Wyoming, USA. (3) FeS₂.

Polymorphism & Series: Dimorphous with pyrite.

Mineral Group: Marcasite group.

Occurrence: Typically formed under low-temperature highly acidic conditions, both in sedimentary environments (shales, limestones, and low rank coals) and in hydrothermal veins formed by ascending solutions.

Association: Pyrite, pyrrhotite, galena, sphalerite, fluorite, dolomite, calcite.

Distribution: From numerous localities world-wide. In the USA, at Joplin, Jasper Co., Missouri; Picher and Cardin, Ottawa Co., Oklahoma; and Baxter Springs and Galena, Cherokee Co., Kansas; in Wisconsin, at Mineral Point, Iowa Co., and Racine, Racine Co. In the Czech Republic, from Vintřov, Litmice, Most, Osek, and other places. In Germany, at Clausthal, in the Harz Mountains, and Freiberg and Annaberg, Saxony. In France, at Cap Blanc-Nez, Pas-de-Calais. From England, in the chalk at Kent, and between Folkestone and Dover; at Tavistock, Devon. In Mexico, in the Santa Eulalia district, Chihuahua. From Llallagua, Bolivia. In the Opu mine, Akita Prefecture, Japan.

Name: A word of Arabic or Moorish origin, early applied to pyrite and other substances.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 311–315. (2) Brostigen, G., A. Kjekshus, and C. Rømming (1973) Compounds with the marcasite type crystal structure VIII. Redetermination of the prototype. *Acta Chem. Scand.*, 27, 2791–2796. (3) Dódoný, I., M. Pósfai, and P.R. Buseck (1996) Structural relationship between pyrite and marcasite. *Amer. Mineral.*, 81, 119–125. (4) Berry, L.G. and R.M. Thompson (1962) X-ray powder data for the ore minerals. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 85, 102. (5) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 354.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Cubic. *Point Group:* $2/m\bar{3}$. Typically cubic, pyritohedral, octahedral, and combinations of these and other forms, to 25 cm or more. Striated conforming to pyritohedral symmetry; may be elongated to acicular. Commonly granular, globular, framboidal, stalactitic. *Twinning:* Twin axis [001] and twin plane {011}, penetration and contact twins.

Physical Properties: *Cleavage:* Indistinct on {001}; partings on {011} and {111}, indistinct. *Fracture:* Conchoidal to uneven. *Tenacity:* Brittle. Hardness = 6–6.5 VHN = 1505–1520 (100 g load). D(meas.) = 5.018 D(calc.) = 5.013 Paramagnetic; a semiconductor.

Optical Properties: Opaque. *Color:* Pale brass-yellow, tarnishes darker and iridescent; in polished section creamy white. *Streak:* Greenish black to brownish black. *Luster:* Metallic, splendent. *Anisotropism:* Rarely.

R: (400) 38.2, (420) 40.5, (440) 42.8, (460) 45.5, (480) 48.5, (500) 51.0, (520) 52.6, (540) 53.8, (560) 54.6, (580) 55.0, (600) 55.2, (620) 55.5, (640) 56.0, (660) 56.4, (680) 56.8, (700) 57.0

Cell Data: *Space Group:* $Pa\bar{3}$. $a = 5.4179(11)$ $Z = 4$

X-ray Powder Pattern: Synthetic.

1.6332 (100), 2.7088 (85), 2.4281 (65), 2.2118 (50), 1.9155 (40), 3.128 (35), 1.4479 (25)

Chemistry:

	(1)	(2)	(3)	(4)
Fe	46.49	29.30	33.32	46.55
Ni		16.69	0.19	
Co		trace	13.90	
S	53.49	53.40	52.45	53.45
Total	99.98	99.39	99.86	100.00

(1) Elba, Italy; remainder 0.04% SiO₂. (2) Mill Close mine, Derbyshire, England.

(3) Gladhammar, Sweden. (4) FeS₂.

Polymorphism & Series: Dimorphous with marcasite; forms a series with cattierite.

Mineral Group: Pyrite group.

Occurrence: Formed under a wide variety of conditions. In hydrothermal veins as very large bodies, as magmatic segregations, as an accessory mineral in igneous rocks, in pegmatites; in contact metamorphic deposits, also in metamorphic rocks; as diagenetic replacements in sedimentary rocks.

Association: Pyrrhotite, marcasite, galena, sphalerite, arsenopyrite, chalcopyrite, many other sulfides and sulfosalts, hematite, fluorite, quartz, barite, calcite.

Distribution: The most abundant and widespread sulfide. Only a few localities for large or fine crystals can be mentioned. From Rio Marina, on Elba, and at Traversella, Piedmont, Italy. From Ambasaguas and Navajun, Logroño Province, Spain, sculptural groups of crystals. At Aktchitao, Kazakhstan. In the USA, in the Ibex mine, Leadville, Lake Co., Colorado; in Illinois, as “suns” at Sparta, Randolph Co.; very large crystals from the Santo Niño mine, near Duquesne, Santa Cruz Co., Arizona. In Pennsylvania, at the French Creek mines, Chester Co., and in the Carleton talc mine, Chester, Windsor Co., Vermont. From Butte, Silver Bow Co., Montana; at the Spruce claim, King Co., Washington; as “bars” from the Buick mine, Bixby, Iron Co., Missouri. In Peru, from many districts, with exceptional crystals from the Quiruvilca mine, La Libertad, and Huanzala, Huanaco.

Name: From the Greek for *fire*, as sparks may be struck from it.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 282–290. (2) Brostigen, G. and A. Kjekshus (1969) Redetermined crystal structure of FeS₂ (pyrite). Acta Chem. Scand., 23, 2186–2188. (3) Dódon, I., M. Pósai, and P.R. Buseck (1996) Structural relationship between pyrite and marcasite. Amer. Mineral., 81, 119–125. (4) (1955) NBS Circ. 539, 5, 29.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Monoclinic, pseudohexagonal. *Point Group:* $2/m$. Crystals typically tabular or platy on {0001}, to 40 cm; steep pyramidal faces or short pyramidal; as rosettes showing nearly parallel aggregation on {0001}; commonly massive, granular. *Twining:* On {1012}.

Physical Properties: *Cleavage:* Parting on {0001}, distinct. *Fracture:* Uneven to subconchoidal. Hardness = 3.5–4.5 VHN = 373–409 (100 g load). $D(\text{meas.}) = 4.58\text{--}4.65$ $D(\text{calc.}) = 4.69$ Magnetic, varying in intensity inversely with iron content.

Optical Properties: Opaque. *Color:* Bronze-yellow to pinchbeck-brown; tarnishes quickly, rarely to iridescence. *Streak:* Dark grayish black. *Luster:* Metallic. *Pleochroism:* Weak. *Anisotropism:* Strong.

$R_1\text{--}R_2$: (400) 27.9–31.0, (420) 28.6–32.2, (440) 29.4–33.6, (460) 30.3–34.8, (480) 31.4–36.2, (500) 32.4–37.6, (520) 33.4–38.6, (540) 34.5–39.6, (560) 35.5–40.4, (580) 36.5–41.2, (600) 37.4–42.0, (620) 38.3–42.6, (640) 39.1–43.0, (660) 39.9–43.5, (680) 40.7–43.9, (700) 41.4–44.1

Cell Data: *Space Group:* Depends on polytype. $a = 6.865$ $b = 11.9$ $c = 22.72$
 $\beta = 90^\circ 5'$ $Z = 64$

X-ray Powder Pattern: Santa Eulalia, Mexico.

2.08 (10), 2.65 (6), 1.728 (5), 3.00 (4), 1.328 (4), 1.105 (4), 1.052 (3)

Chemistry:

	(1)	(2)	(3)
Fe	60.18	59.83	61.57
S	39.82	39.55	38.53
rem.		0.55	
Total	100.00	99.93	100.10

(1) Homestake mine, Lead, Lawrence Co., South Dakota, USA; corresponds to $\text{Fe}_{0.87}\text{S}_{1.00}$.

(2) Kongsberg, Norway; average of two analyses, corresponds to $\text{Fe}_{0.87}\text{S}_{1.00}$. (3) Setregruben, Østfold, Norway; corresponds to $\text{Fe}_{0.92}\text{S}_{1.00}$.

Polymorphism & Series: Numerous polytypes, with 4-M, 6-M, 5-H, 7-H, and 11-H known, and a high-temperature hexagonal polymorph which may remain stable at ordinary temperatures.

Occurrence: Mainly in mafic igneous rocks, typically as magmatic segregations; also in pegmatites, and in high-temperature hydrothermal and replacement veins, and in sedimentary and metamorphic rocks; in iron meteorites.

Association: Pyrite, marcasite, chalcopyrite, pentlandite, many other sulfides, magnetite, calcite, dolomite.

Distribution: Massive material occurs at many localities. Well-crystallized from Herja (Kisbánya), Baia Mare (Nagybánya) district, Romania. From the Stari Trg mine, Trepča, Serbia. In Val Passiria, Trentino-Alto Adige, and at Bottino, near Servezza, Tuscany, Italy. In Germany, in the Harz Mountains, at St. Andreasberg. From the Bristenstock tunnel, Uri, Switzerland. In Sweden, at Falun, Kopparberg. In Russia, very large crystals at Dal'negorsk, Primorskiy Kray. Large crystals from the Morro Velho gold mine, Nova Lima, Minas Gerais, Brazil. At the Potosí and San Antonio mines, Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico. From the Bluebell mine, Riondel, British Columbia, Canada.

Name: From the Greek for *redness*, in allusion to its color.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 231–235. (2) Deer, W.A., R.A. Howie, and J. Zussman (1962) Rock-forming minerals, v. 5, non-silicates, 145–157. [change this to new vol V??must - and review - if H polymorphs should have hexagonal system added also??] (3) Francis, C.A. and J.R. Craig (1976) Pyrrhotite: the nA (or $2A$, $3C$) superstructure reviewed. Amer. Mineral., 61, 21–25. (3) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 466. (5) Berry, L.G. and R.M. Thompson (1962) X-ray powder data for the ore minerals. Geol. Soc. Amer. Mem. 85, 60.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

Crystal Data: Cubic. *Point Group:* $\bar{4}3m$. Crystals tetrahedral, dodecahedral, typically complex and distorted, curved and conical faces common, to 30 cm. Also fibrous, botryoidal, stalactitic, cleavable, coarse to fine granular, massive. *Twinning:* Twin axis [111], twin plane {111}, simple contact twins or complex lamellar forms.

Physical Properties: *Cleavage:* Perfect on {011}. *Fracture:* Conchoidal. *Tenacity:* Brittle. Hardness = 3.5–4 VHN = 208–224 (100 g load). $D(\text{meas.}) = 3.9\text{--}4.1$ $D(\text{calc.}) = 4.096$ Pyroelectric, may be triboluminescent, fluorescent.

Optical Properties: Transparent to translucent, opaque when iron-rich. *Color:* Highly variable, ranging from colorless to dark brown, gray, black, commonly brown, yellow, red, green. *Streak:* Pale brown to pale yellow and white. *Luster:* Resinous to adamantine. *Optical Class:* Isotropic. $n = 2.369$ (Na) (ZnS). *Anisotropism:* May show strain-induced birefringence.

R: (400) 19.6, (420) 19.0, (440) 18.3, (460) 17.9, (480) 17.5, (500) 17.2, (520) 16.9, (540) 16.7, (560) 16.5, (580) 16.4, (600) 16.3, (620) 16.2, (640) 16.1, (660) 16.0, (680) 15.9, (700) 15.8

Cell Data: *Space Group:* $F\bar{4}3m$. $a = 5.4060$ $Z = 4$

X-ray Powder Pattern: Synthetic ZnS.

3.123 (100), 1.912 (51), 1.561 (30), 2.705 (10), 1.240 (9), 1.1034 (9), 1.351 (6)

Chemistry:	(1)	(2)	(3)		(1)	(2)	(3)
Zn	66.98	44.67	67.10	Mn		2.66	
Fe	0.15	18.25		S	32.78	33.57	32.90
Cd		0.28					
				Total	99.91	99.43	100.00

(1) Sonora, Mexico; corresponds to $\text{Zn}_{1.00}\text{S}_{1.00}$. (2) St. Christoph mine, Isère, France; corresponds to $(\text{Zn}_{0.65}\text{Fe}_{0.31}\text{Mn}_{0.05})_{\Sigma=1.01}\text{S}_{1.00}$. (3) ZnS.

Polymorphism & Series: Trimorphous with matraite and wurtzite.

Mineral Group: Sphalerite group.

Occurrence: Formed under a wide range of low- to high-temperature hydrothermal conditions; in coal, limestone, and other sedimentary deposits.

Association: Galena, chalcopyrite, marcasite, pyrite, fluorite, barite, quartz, many other hydrothermal minerals.

Distribution: The most important ore of zinc. Only a few localities for the finest crystallized examples can be given. In Germany, from Freiberg, Saxony, and Neudorf, Harz Mountains. Colorless crystals in the Lengenbach quarry, Binntal, Valais, Switzerland. At Horní Slavkov (Schlaggenwald) and Příbram, Czech Republic. From Rodna, Romania. Transparent crystals in the Aliva mine, Picos de Europa Mountains, Cantabria [Santander] Province, Spain. In England, from Alston Moor, Cumbria. At Dal'negorsk, Primorskiy Kray, Russia. From Watson Lake, Yukon Territory, Canada. In the USA, in the Tri-State district of the Mississippi Valley; near Baxter Springs, Cherokee Co., Kansas; Joplin, Jasper Co., Missouri and Picher, Ottawa Co., Oklahoma. From the Elmwood mine, near Carthage, Smith Co., Tennessee; in the Eagle mine, Gilman district, Eagle Co., Colorado. In Mexico, from Santa Eulalia and Naica, Chihuahua, and Cananea, Sonora. At Huaron, Casapalca, and Huancavelica, Peru.

Name: From the Greek for *treacherous*, the mineral sometimes being mistaken for galena, but yielding no lead.

References: (1) Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1944) Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. I, 210–215. (??) Ewald, ?? (1916) ??title?? Ann. Phys.,??, 257–??. str?? or (1980) Acta Cryst., A36, 482 ?? (2) (1953) NBS Circ. 539, 2, 16. (3) Criddle, A.J. and C.J. Stanley, Eds. (1993) Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 523.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without the prior written permission of Mineral Data Publishing.

ANEXO 4:

RESULTADOS DE

GRAVEDAD

ESPECÍFICA

Gravedad Específica (GE)

$$W_p = \text{Peso Picnómetro}$$

$$W_{pm} = \text{Peso Picnómetro} + \text{Peso Muestra}$$

$$W_{pw} = \text{Peso Picnómetro} + \text{Peso Agua sola}$$

$$W_{test} = \text{Peso Picnómetro} + \text{Peso Muestra} + \text{Peso Agua}$$

$$GE = \frac{W_{pm} - W_p}{W_{pw} + W_{pm} - W_p - W_{test}}$$

$$GE = \frac{\text{Peso de muestra}}{\text{Peso Agua sola} - \text{Peso Agua}}$$

	GE
Compósito	3.00
Óxido +	2.66
Óxido ++	2.69
Óxido +++	2.75
Óxido ++++	2.80
Sulfuro +	3.00
Sulfuro ++	3.03
Sulfuro +++	3.19
Sulfuro ++++	3.58
Conc Flot SF	3.70

Muestra	Prometeo							
ID_Pic	Pic_11	Pic_12	Pic_11	Pic_12	Pic_5	Pic_6	Pic_7	Pic_8
Wp	32.960	33.066	32.953	33.069	32.699	33.160	32.613	32.830
Wpm	40.850	41.611	37.908	38.762	38.425	39.469	37.758	39.194
Wtest	89.016	88.616	87.063	86.712	86.552	87.250	87.370	87.066
Wpw	83.764	82.918	83.764	82.918	82.727	83.036	83.940	82.814
GE	2.991	3.001	2.992	2.998	3.012	3.011	3.000	3.013
Max	3.013	Promed	3.002					
Min	2.991	Desviación	0.009					

Muestra	Óxido +			
ID_Pic	Pic_2	Pic_4	Pic_2	Pic_4
Wp	31.267	34.862	31.266	34.861
Wpm	36.230	36.619	33.927	37.558
Wtest	84.646	85.969	83.199	86.556
Wpw	81.544	84.872	81.544	84.872
GE	2.667	2.662	2.645	2.662
Max	2.667	Promedio	2.659	
Min	2.645	Desviación	0.010	

Muestra	Óxido ++			
ID_Pic	Pic_5	Pic_6	Pic_5	Pic_6
Wp	32.700	33.159	32.700	33.160
Wpm	35.765	37.011	34.812	35.354
Wtest	84.640	85.436	84.042	84.395
Wpw	82.716	83.017	82.716	83.017
GE	2.686	2.688	2.687	2.689
Max	2.689	Promedio	2.688	
Min	2.686	Desviación	0.001	

Muestra	Óxido +++			
ID_Pic	Pic_7	Pic_8	Pic_7	Pic_8
Wp	32.610	32.831	32.614	32.831
Wpm	37.715	38.385	35.333	35.637
Wtest	87.158	86.331	85.645	84.578
Wpw	83.919	82.788	83.919	82.788
GE	2.736	2.762	2.738	2.762
Max	2.762	Promedio	2.749	
Min	2.736	Desviación	0.014	

Muestra	Óxido ++++			
ID_Pic	Pic_9	Pic_10	Pic_9	Pic_10
Wp	32.891	32.465	32.891	32.465
Wpm	35.754	36.913	36.614	34.558
Wtest	85.624	85.356	86.189	83.843
Wpw	83.787	82.496	83.787	82.496
GE	2.790	2.801	2.818	2.806
Max	2.818	Promedio	2.804	
Min	2.790	Desviación	0.012	

Muestra	Sulfuro +			
ID_Pic	Pic_5	Pic_6	Pic_5	Pic_6
Wp	32.700	33.160	32.701	33.160
Wpm	38.208	42.065	37.269	38.524
Wtest	86.308	88.880	85.689	86.528
Wpw	82.640	82.947	82.639	82.948
GE	2.993	2.996	3.009	3.007
Max	3.009	Promedio	3.001	
Min	2.993	Desviación	0.008	

Muestra	Sulfuro ++			
ID_Pic	Pic_7	Pic_8	Pic_7	Pic_8
Wp	32.610	32.831	32.610	32.830
Wpm	38.377	39.035	40.739	38.925
Wtest	87.708	86.882	89.288	86.819
Wpw	83.842	82.730	83.842	82.730
GE	3.034	3.023	3.030	3.038
Max	3.038	Promedio	3.031	
Min	3.023	Desviación	0.006	

Muestra	Sulfuro +++			
ID_Pic	Pic_9	Pic_10	Pic_9	Pic_10
Wp	32.892	32.404	32.892	32.402
Wpm	37.370	41.928	40.449	40.991
Wtest	86.808	88.928	88.930	88.290
Wpw	83.735	82.388	83.734	82.388
GE	3.187	3.192	3.201	3.197
Max	3.201	Promedio	3.194	
Min	3.187	Desviación	0.006	

Muestra	Sulfuro ++++			
ID_Pic	Pic_11	Pic_12	Pic_11	Pic_12
Wp	32.952	33.069	32.951	33.069
Wpm	37.514	37.351	39.900	38.845
Wtest	86.971	85.944	88.693	87.026
Wpw	83.682	82.858	83.681	82.858
GE	3.584	3.580	3.588	3.592
Max	3.592	Promedio	3.586	
Min	3.580	Desviación	0.005	

ANEXO 5:
ANÁLISIS
ESTADÍSTICO SIN
NORMALIZAR

ANEXO 6:
ESTUDIO
MINERALÓGICO
POR FASES
BRILLANTES

XIV.- RESUMEN

La presencia de minerales de Oro y/o Plata ocurre como diferentes Fases Mineralógicas, existiendo en este grupo las siguientes Fases y porcentajes:

Primary phases / Mass of Gold (%)	35%					45%					60%					Σ	% Promedio
	H-1F	H-1G	H-2	H-3	H-4	A-1F	A-1G	A-2	A-3	A-4	I-1F	I-1G	I-2	I-3	I-4		
Electrum++Ag	38.10	5.98	3.51	62.50	54.55	15.20	15.20	64.89	61.19	57.07	28.96	30.41	54.46	41.25	61.56	594.82	39.65
Electrum+++Ag	57.84	13.66	74.70	2.86	28.97	45.62	45.62	16.58	22.69	25.17	40.69	58.46	33.91	52.51	38.44	557.72	37.18
Electrum+Ag	0.71	6.27	11.03	34.64	0.00	37.63	37.63	18.54	8.90	6.95	30.34	1.68	3.64	4.39	0.00	202.35	13.49
Silver+Au	2.56	60.17	10.75	0.00	1.00	1.56	1.56	0.00	1.28	0.00	0.00	5.27	7.99	0.39	0.00	92.53	6.17
Gold+Ag	0.79	13.92	0.00	0.00	15.48	0.00	0.00	0.00	5.93	10.81	0.00	4.19	0.00	1.46	0.00	52.59	3.51
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	1500.00	100.00

Como puede observarse del cuadro superior, las Fases Mineralógicas Electrum +++Ag y Silver +Au, representan un promedio de un 43.33% de Oro refractario, del cual parte puede ser recuperado pero, probablemente se tenga un relave más alto del promedio.

Hay presencia de sulfuros base de Fe, Zn, Cu, As, Pb, como las mencionadas líneas abajo:

Primary phases / Mass of Sulphur (%)	35%					45%					60%					Σ	% Promedio
	H-1F	H-1G	H-2	H-3	H-4	A-1F	A-1G	A-2	A-3	A-4	I-1F	I-1G	I-2	I-3	I-4		
Pyrite	2.23	1.99	9.32	10.97	7.54	3.01	1.61	8.70	10.69	8.08	3.05	1.95	8.97	11.36	7.45	96.92	6.46
Arsenopyrite	0.34	0.35	1.27	2.03	2.01	0.45	0.46	1.03	1.84	1.95	0.34	0.34	1.13	1.88	1.85	17.26	1.15
Sphalerite	0.22	0.20	0.86	0.86	1.11	0.26	0.04	0.78	0.90	1.09	0.31	0.06	0.69	0.86	1.08	9.39	0.62
Galena	0.03	0.01	0.19	0.37	0.46	0.03	0.02	0.09	0.33	0.45	0.03	0.03	0.11	0.29	0.39	2.82	0.19
Total	2.82	2.55	11.64	14.23	11.12	3.75	2.13	10.61	13.76	11.58	3.73	2.37	10.90	14.39	10.77	126.38	8.49

Minerales de Sb y/o Pb

Minerales de Zn

Minerales de Fe y/o As

Existen minerales de Cu, Ag Sb, Fe, que no se han considerado por estar en cantidades menores.

La gran mayoría de los granos de Oro y/o Plata tienen tamaños menores a 10 micras y las partículas que los contienen, predominan en un 65% en peso, las que tienen tamaños comprendidos entre 3.5 a 49 micras, según se observa en el cuadro inferior:

Size range / Mass of Silver (%)	35%					45%					60%					Σ	% Promedio
	H-1F	H-1G	H-2	H-3	H-4	A-1F	A-1G	A-2	A-3	A-4	I-1F	I-1G	I-2	I-3	I-4		
>0.10<0.24 μm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>0.24<0.59 μm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>0.59<1.4 μm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>1.4<3.5 μm	3.67	3.96	4.26	1.09	6.15	12.50	12.50	6.65	2.83	5.18	44.43	12.77	6.71	2.02	5.64	130.36	8.69
>3.5<8.4 μm	23.94	12.94	14.39	13.46	35.31	75.39	75.39	51.53	5.54	26.90	55.57	62.84	30.68	8.14	94.36	586.38	39.09
>8.4<20 μm	7.01	0.00	22.87	59.67	58.54	12.11	12.11	41.82	2.21	67.92	0.00	21.86	62.61	14.38	0.00	383.11	25.55
>20<49 μm	50.87	0.00	58.48	25.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	2.53	0.00	75.46	0.00	213.17	14.20
>49<119 μm	14.51	83.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	186.99	12.47
>119<289 μm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>289<700 μm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	1500.00	100.00