



El futuro  
es de todos

Minenergía



GUÍA METODOLÓGICA  
PARA EL MEJORAMIENTO  
PRODUCTIVO DEL BENEFICIO  
**DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO**

PUERTO LIBERTADOR (CÓRDOBA)

SERVICIO  
GEOLOGICO  
COLOMBIANO







GUÍA METODOLÓGICA  
PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO  
DEL BENEFICIO DE ORO  
SIN EL USO DE MERCURIO

---

**PUERTO LIBERTADOR (CÓRDOBA)**

**GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO  
DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO. PUERTO LIBERTADOR (CÓRDOBA)**

**MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA  
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**

**Directora Técnica de Laboratorios SGC (E)**

Gloria Prieto Rincón. Química, PhD en Geoquímica

**Supervisor del Convenio Interadministrativo 319 de 2018 y Coordinador del Grupo de Trabajo Cali SGC**

Jorge Iván Londoño Escobar. Ingeniero químico, MSc. en Ciencias Químicas

**Apoyo a la supervisión del Convenio por parte del Ministerio de Minas y Energía**

Fernanda Polanía Escobar

**GRUPO DE GEOLOGÍA**

Jaime Mojica Buitrago. Geólogo, experto en petrografía (Responsable del grupo)  
William Andrés Pulido. Geólogo, MSc en Ciencias en Geología de Minas con Honores  
Óscar David Cardona Sánchez. Geólogo  
Paulo Duarte Hernández. Geólogo  
Alejandro Cándelo Ríos. Pasante de Geología  
Julián Vélez Correa. Pasante de Geología

**GRUPO DE MINERÍA**

Fhilly Mabel Abueta. Ingeniera de Minas, MSc. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

**GRUPO DE METALURGÍA**

Harold Iván Concha. Ingeniero químico, especialista en Metalurgia aplicada en Minería (Responsable del grupo)  
Diana Sofía Muñoz. Ingeniera Química  
Gabriel Kamilo Pantoja. Ingeniero Químico, MSc. en ciencias, en ingeniería metalúrgica y de Materiales, DSc.  
en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales  
Fabián Andrés Ramírez Pita. Ingeniero Metalúrgico  
Silvia Natalia Fuentes Torres. Ingeniera Metalúrgica  
David Parra Peña. Pasante Ingeniería Química

**GRUPO DE QUÍMICA**

Verónica Ruiz Solano. Química, MSc. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (Responsable del grupo)  
Viviana Fernanda Pérez. Química, (Responsable de gestión de calidad)  
Annie Alexandra Arango. Tecnóloga Química  
Daniel Castañeda Pinzón. Tecnólogo Químico  
Giovanni Andrés Alarcón. Asistencial Operativo  
Andrés Castrillón Asistencial Operativo  
Liseth Irene Franco. Ingeniera Sanitaria y Ambiental  
Oscar Fernando González. Químico, MSc en Ciencias Química

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA**

Yury Marentes Laverde. Economista

**DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**

Juan Sebastián Garzón. Diseñador Industrial

ISBN: 978-958-52286-9-6

ISBN digital: 978-958-52317-0-2

**Comité Editorial SGC:** ceditorial@sgc.gov.co

**Presidente**

Teresa Duque

**Integrantes**

Virgilio Amarís  
Viviana Dionicio  
Julián Escallón  
Armando Espinosa  
Guillermo Parrado

**Grupo Técnico de la Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias**

**Profesor Juan Carlos Molano Mendoza**

Geólogo. MSc. Geología Económica.

**Ariel Oswaldo Cadena Sánchez**

Químico. MSc. Ciencias Químicas, PhD en Ciencias Químicas.

**Bibiana Paola Rodríguez Ramos**

Geóloga. Msc. en Geología

**Nathalia Marcela Guerrero Higuera**

Geóloga

**Martha Patricia Valenzuela**

Geóloga

Jorge Enrique Ruiz Urueña. Geólogo. Msc. en Ciencias de la Tierra.  
Andrea Milena Mayor Amador. Geóloga  
Lorena Esperanza Marroquín Molina. Geóloga  
Sergio Esteban Montes Miranda. Geólogo  
Angie Catherin Cardona Alarcón. Geóloga  
Yael Natalia Méndez Chaparro. Estudiante auxiliar  
Valentina Bocanegra Olivera. Estudiante auxiliar  
Lorena Valderrama Castillo. Estudiante auxiliar  
Orlando Alcides Ardila Traslavina. Estudiante auxiliar  
Dubán Esteban Gómez Gómez. Estudiante auxiliar  
Julián David Medina Arboleda. Estudiante auxiliar  
María Camila López. Estudiante auxiliar

**Grupo Técnico de la Facultad de Geología de la Universidad de Caldas, Proyecto Geometalúrgico**

**Sergio José Castro**

Ingeniero de Minas y Metalurgia. Esp. Técnicas Mineras. MSc. Ingeniería de materiales y Procesos

**Luz Mary Toro Toro**

Ingeniera Geóloga. Esp. Sensores Remotos Aplicados Geología. MSc. Ciencias - Geología. MSc. Educación

**Elvira Cristina Ruiz Jiménez**

Geóloga. MSc. Ciencias de la Tierra

**Mauricio Alvarán Echeverri**

MSc. Ciencias - Geología. Especialista en Sismología. Especialista en Docencia Universitaria

**Diego Germán Loaiza García**

Geólogo. Candidato a Magíster Énfasis Yacimientos Minerales

**Cooperativa del Distrito Minero de Puerto Libertador (Córdoba).**

# MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

**MARÍA FERNANDA SUÁREZ LONDOÑO**

Ministra de Minas

**CAROLINA ROJAS HAYES**

Viceministra de Minas

**PABLO CÁRDENAS REY**

Secretario general

**JHON LEONARDO OLIVARES RIVERA**

Director de Formalización Minera (E)

**LAURA VICTORIA BECHARA ARCINIEGAS**

Oficina Asesora Jurídica

**SANDRA MILENA SÁNCHEZ ZULUAGA**

Supervisora del convenio

**CAMILO ENRIQUE ÁLVAREZ**

Grupo de Gestión Contractual

Punto de atención presencial: calle 43 n.º 57-31, CAN, Bogotá D. C., Colombia

PBX: (57) +1 2200300 / Línea gratuita nacional: 01 8000 910 180

Código postal: 111321

## GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO. PUERTO LIBERTADOR (CÓRDOBA)

Este documento se ha elaborado en el marco del Convenio Interadministrativo GGC n.º 319 de 2018, celebrado entre el Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Geológico Colombiano, cuyo propósito es la elaboración de una guía metodológica mediante la caracterización mineralógica, química, metalúrgica y ambiental de la zona minera de Puerto Libertador (Córdoba), aplicada al mejoramiento productivo de la extracción del oro sin el uso de mercurio en el proceso de beneficio en la pequeña minería de Colombia.

Ministerio de Minas y Energía  
Viceministerio de Minas  
Dirección de Formalización Minera

Servicio Geológico Colombiano  
Dirección de Laboratorios, Grupo de Trabajo Cali

Fotografía de portada: La imagen de portada muestra al grupo técnico del Servicio Geológico Colombiano reunidos en el campamento de la mina el Alacrán, durante el desarrollo del trabajo de campo en el municipio de Puerto Libertador (Córdoba).

© Servicio Geológico Colombiano

## SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

**OSCAR PAREDES ZAPATA**

Director general

**GLORIA PRIETO RINCÓN**

Directora técnica de laboratorios (E)

**JUAN PABLO MARÍN ECHEVERRY**

Secretario general

**DALIA INÉS OLARTE MARTÍNEZ**

Oficina Asesora Jurídica  
Grupo de Trabajo Contratos y Convenios (E)

**JORGE IVÁN LONDOÑO ESCOBAR**

Supervisor del convenio

**OLGA PATRICIA ROCHA SÁNCHEZ**

Grupo de Trabajo Planeación

Punto de atención presencial: diagonal 53 n.º 34-53, Bogotá D. C., Colombia  
PBX: (57) +1 2200200-220 0100-222 1811-222 07 97 / Línea gratuita nacional: (571) 01-8000 110842

Código postal 110842

# PRESENTACIÓN

La presente *Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio del oro sin el uso del mercurio* Puerto Libertador (Córdoba) hace parte de la segunda fase del estudio que aplica lo establecido en el Plan Estratégico Sectorial para la Eliminación del Uso del Mercurio, y se traduce en un aporte significativo del Servicio Geológico Colombiano a la minería en Colombia, atendiendo a un claro compromiso del Ministerio de Minas y Energía por la preservación de la salud humana y la mitigación de los impactos ambientales generados por el desarrollo de actividades mineras, en especial aquellas que no cumplen plenamente con las normas y los mandatos nacionales e internacionales, orientadas hacia la eliminación del uso del mercurio en la actividad industrial minera.

Esta guía metodológica y la generación de conocimiento geocientífico, en general, que realiza el Servicio Geológico Colombiano se ajustan a lo preceptuado en las bases para la consolidación de una política de Estado en ciencia, tecnología e innovación (artículo 3.º de la Ley 1286 de 2009, “Por la cual se modifica la Ley 29 de 1990, se transforma a Colciencias en departamento administrativo, se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia y se dictan otras disposiciones”), entre las que se destacan: “Incorporar la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación a los procesos productivos, para incrementar la productividad y la competitividad que requiere el aparato productivo nacional. [...] Integrar esfuerzos de los diversos sectores y actores para impulsar áreas de conocimiento estratégicas para el desarrollo del país. [...] Promover el desarrollo de estrategias regionales para el impulso de la ciencia, la tecnología y la innovación, aprovechando las potencialidades en materia de recursos naturales...”.

El Ministerio de Minas y Energía, mediante la adopción de la Política Minera Nacional, estableció claramente que “El objetivo fundamental es que la actividad minera, en todas sus escalas, se desarrolle de forma ordenada, incluyente, competitiva y responsable”, ante lo cual el Servicio Geológico Colombiano, en los ámbitos de su competencia como entidad perteneciente al Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación, genera conocimiento geocientífico, y así hace valiosos aportes dirigidos a satisfacer la necesidad que tiene el país de contar con alternativas tecnológicas de producción más limpia en los procesos de beneficio de oro que conduzcan a la eliminación del uso del mercurio.

A lo largo de esta guía metodológica, el lector podrá encontrar una descripción integral de los resultados del estudio, para lo cual se incluyen capítulos como el marco de referencia, donde se indica la situación actual de la zona minera de Puerto Libertador, los objetivos y el alcance de la guía; metodología de trabajo; aspectos geológicos, mineros, metalúrgicos, químicos y ambientales; ruta metalúrgica propuesta; estudio económico y financiero.

Vale la pena resaltar que la guía metodológica no se centró solamente en definir elementos puramente técnico-científicos, pues se consideró relevante y necesario realizar un análisis económico y financiero riguroso y real, con el fin de establecer la conveniencia de emprender exitosamente un proyecto minero y efectuar una asignación eficiente de los recursos. En el capítulo dedicado a este tema se incluyen los fundamentos metodológicos mínimamente necesarios para que el minero pueda realizar un ejercicio de planeación y evaluación financiera de la operación de la mina y de la planta de beneficio, utilizando la ruta metalúrgica propuesta en esta guía.

**Oscar Paredes Zapata**  
**Director General**  
**Servicio Geológico Colombiano**

# AGRADECIMIENTOS

El Ministerio de Minas y Energía, y el Servicio Geológico Colombiano agradecen a todas las personas que realizaron aportes al desarrollo de la presente guía metodológica, quienes se mencionan en los listados de participantes, así como a los integrantes del equipo de trabajo y a la Universidad Nacional de Colombia.

Asimismo, agradecen a los mineros de la zona de Puerto Libertador (Córdoba) por abrir sus puertas y recibir a las instituciones para permitir la investigación, el reconocimiento y el muestreo en las diferentes minas y plantas de beneficio.

# CONTENIDO

## INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO DE REFERENCIA

1.1. Descripción de la situación actual	18
1.2. Descripción de la necesidad	20
1.3. Objetivos	23
1.4. Alcance	23

### 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Revisión bibliográfica	26
2.2. Muestreo	26
2.3. Análisis e interpretación	26
2.4. Pruebas	27
2.5. Propuesta ruta metalúrgica	27

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Localización de la zona de estudio	30
3.2. Municipio de Puerto Libertador (Córdoba)	31
3.3. Vías de acceso	32
3.4. Ubicación de minas y plantas de beneficio	33

### 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.1. Fundamentos teóricos: geología y yacimientos minerales	36
4.1.1. Generalidades de yacimientos auríferos	37
4.1.2. Identificación de minerales en el frente de mina	42
4.1.3. Sulfuros asociados a la mena	43
4.2. Geología del distrito minero de Puerto Libertador (Córdoba)	45
4.2.1. Geología local	45
4.2.2. Geología estructural	45
4.2.3. Alteración hidrotermal	47
4.2.3.1. Mina El Alacrán	47
4.2.3.2. Mina Teherán	48
4.2.3.3. Mina Pirita	49
4.2.3.4. Mina RAA	49
4.2.4. Metalogénesis y mineralización aurífera	50
4.2.4.1. Características metalogenéticas de explotaciones	50
4.2.4.2. Microtermometría y análisis de inclusiones fluidas	54
4.2.4.3. Secuencia paragenética	55
4.2.5. Ocurrencia de oro en veta	56
4.2.5.1. Distribución de tamaño de oro	57
4.2.5.2. Calidad del oro	57
4.2.6. Modelo metalogénico	58
4.2.7. Unidades geometalúrgicas (UGMs).	58
4.3. Análisis petrográficos de material de proceso metalúrgico	60
4.3.1. Composición	60
4.3.2. Asociación de minerales metálicos	62
4.3.3. Liberación de minerales metálicos	64
4.3.4. Liberación de oro	66
4.4. Consideraciones en geología y mineralogía para el beneficio	69

### 5. ASPECTOS MINEROS

5.1. Fundamentos técnico-mineros	72
5.1.1. Etapas de un proyecto minero	72

5.1.1.1. Métodos de explotación	73
5.1.2. Métodos de arranque	80
5.1.3. Tipos de sostenimiento	80
5.1.4. Tipos de ventilación	83
5.1.5. Carga y transporte de mineral	84
5.2. Estudio minero de la zona minera	85
5.2.1. Minas visitadas	86
5.2.2. Caracterización de la Actividad Minera	86
5.2.2.1. Mina artesanal Teherán	86
5.2.2.2. Pequeña explotación minera Buenos Aires	88
5.2.2.3. Mina artesanal Pirita	89
5.2.2.4. Mina artesanal Raa	91
5.2.2.5. Mina artesanal El Alacrán	92
5.3. Análisis minero	93
5.3.1. Proyecciones inferidas para las pequeñas explotaciones mineras visitadas	94
5.4. Consideraciones mineras	95
5.4.1. Método de explotación	95
5.4.2. Sostenimiento	98
5.4.3. Ventilación	100
5.4.4. Minero-ambientales	101
5.5. Conclusiones en aspectos mineros	104

### 6. ASPECTOS METALÚRGICOS

6.1. Fundamentos técnicos del proceso de beneficio metalúrgico	107
6.1.1. Beneficio de minerales en planta	107
6.1.2. Proceso de conminución (trituration y molienda)	108
6.1.2.1. Trituración primaria (gruesa)	108
6.1.2.2. Trituración secundaria (fina)	109
6.1.2.3. Molienda	111
6.1.3. Clasificación granulométrica	114
6.1.4. Clasificación hidráulica	114
6.1.5. Concentración de minerales auríferos por gravimetría	116
6.1.5.1. Concentración gravitacional o gravimétrica	117
6.1.6. Concentración de minerales auríferos por flotación	121
6.1.7. Cianuración	122
6.1.8. Fundición	125
6.1.9. Tratamiento de residuos sólidos en aguas	126

### 7. ASPECTOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

7.1. Contribución química a la caracterización y control de procesos metalúrgicos y ambientales	129
7.2. Fundamentos teóricos: métodos y aplicaciones químicas y ambientales	130
7.2.1. Contaminación por mercurio	130
7.2.1.1. Dinámica del cianuro en un relave de residuo minero	132
7.2.3. Caracterización química y ambiental	134
7.2.3.1. Aplicación de la espectrometría de fluorescencia de rayos X	134
7.2.3.2. Aplicación de la espectrofotometría de absorción atómica	135
7.2.3.3. Aplicación de la técnica espectrofotometría de ultravioleta visible	135
7.2.3.4. Aplicación de la potenciometría de ion cianuro	136
7.2.3.5. Tratamientos de descomposición de cianuro	137
7.2.3.6. Ensayo en laboratorio de la descomposición de cianuro libre y complejo a formas estables	138
7.2.3.7. Pruebas ambientales para relaves	139
7.3. Puntos de muestreo visitados y muestras puntuales analizadas	140
7.4. Resultados de ensayos químicos y ambientales	143
7.4.1. Determinación de pH	143
7.5. Caracterización de sedimentos activos	149
7.6. balance ácido-base (test aba) para la determinación del drenaje ácido de minas (DAM)	153
7.7. Conclusiones Químicas y ambientales	158
7.8. Recomendación	159

## 8. RUTA METALÚRGICA PROPUESTA PARA LA ZONA MINERA

8.1. Proceso de beneficio desarrollado actualmente	162
8.1.1. Planta de beneficio de la mina Pirita	162
8.1.2. Plantas de beneficio de la mina El Alacrán	163
8.2. Tenores de oro en las plantas visitadas	166
8.3. Consideraciones mineralógicas determinantes en las operaciones y procesos metalúrgicos	167
8.4. Pruebas metalúrgicas de laboratorio	167
8.4.1. Propiedades físicas de los minerales de estudio	167
8.4.1.1. Peso específico, índice de Hardgrove en índice de trabajo de Bond (WI)	168
8.4.1.2. Distribución de tamaño de partículas de las muestras preparadas	168
8.4.1.3. Acondicionamiento del mineral para concentración	169
8.4.2. Planta de beneficio Pirita	170
8.4.2.1. Concentración en mesa del mineral de cabeza de la Mina La Cirila	170
8.4.2.2. Refinación en batea	170
8.4.2.3. Concentración Centrífugo	171
8.4.2.4. Cianuración	171
8.4.3. Planta Alacrán	172
8.4.3.1. Concentración centrífuga mineral de cabeza	172
8.4.3.2. Separación magnética	172
8.4.3.3. Concentración por flotación	172
8.4.3.4. Cianuración	173
8.5. Proceso de beneficio sugerido	174
8.6. Balances de materia de los procesos sugeridos	176
8.7. Montaje de la planta de beneficio sugerida	177
8.8. Diagrama de flujo correspondiente a la planta de beneficio sugerida	180
8.9. Conclusiones metalúrgicas	182
8.9.1. Consideraciones sobre las plantas de beneficio en la zona estudiada	182
8.9.2. Consideraciones sobre los materiales que alimentan las plantas de beneficio en la zona estudiada y el método metalúrgico	182

## 9. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

9.1. Fundamentos teóricos para la evaluación financiera del proyecto	186
9.1.1. Generalidades sobre los proyectos de inversión	186
9.1.1.1. Definición	186
9.1.1.2. Clasificación	186
9.1.1.3. El ciclo de los proyectos	186
9.1.2. Estudio y evaluación financiera de proyectos de inversión	188
9.1.2.1. Propósito del estudio financiero	188
9.1.2.2. Etapas del estudio financiero	188
9.1.2.3. Propósito de la evaluación financiera	189
9.1.2.4. Etapas de la evaluación financiera	189
9.2. Metodología para el estudio y evaluación financiera del proyecto en la zona minera de Puerto Libertador (ruta metalúrgica 1)	191
9.2.1. Estudio financiero	191
9.2.1.1. Identificación y valoración de la inversión inicial	192
9.2.1.2. Identificación y valoración de costos de la fase de extracción	194
9.2.1.3. Identificación y valoración de costos de la fase de beneficio	198
9.2.1.4. Identificación y valoración de ingresos de operación	202
9.2.2. Evaluación financiera	203
9.2.2.1. Construcción del flujo de caja del proyecto	203
9.2.2.2. Aplicación de métodos para evaluar proyectos	205
9.3. Estudio y evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 1	206
9.3.1. Resultados e interpretación de indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 1	209
9.4. Estudio financiero de la operación actual vs. la operación futura en la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 1	209
9.4.1. Resultados de la operación actual del beneficio de oro en la zona minera de Puerto Libertador	210

9.4.2. Resumen de indicadores de operación actual vs. operación futura, ruta metalúrgica 1	212
9.4.3. Análisis de resultados de indicadores de operación actual vs. operación futura de la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 1	212
9.5. Consideraciones sobre la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Puerto Libertador	214
9.6. Consideraciones sobre la operación futura de beneficio de oro en la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 1	215
9.7. Metodología para el estudio y evaluación financiera del proyecto en la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2	217
9.7.1. Estudio financiero	217
9.7.1.1. Identificación y valoración de la inversión inicial	217
9.7.1.2. Identificación y valoración de costos de la fase de extracción	219
9.7.1.3. Identificación y valoración de costos de la fase de beneficio	223
9.7.1.4. Identificación y valoración de ingresos de operación	227
9.7.2. Evaluación financiera	228
9.7.2.1. Construcción del flujo de caja del proyecto	228
9.7.2.2. Aplicación de métodos para evaluar proyectos	230
9.8. Estudio y evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2	231
9.8.1. Resultados e interpretación de indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2	233
9.9. estudio financiero de la operación actual con la operación futura en la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2	234
9.9.1. Resultados de la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Puerto Libertador	234
9.9.2. Resumen de indicadores de la operación actual vs. la operación futura, ruta metalúrgica 2	236
9.9.3. Análisis de resultados de indicadores de operación actual vs. operación futura en la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2	237
9.10. Consideraciones sobre la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Puerto Libertador	238
9.11. Consideraciones sobre la operación futura de beneficio de oro en la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2	239

## 10. GLOSARIO

## 11. REFERENCIAS

# INTRODUCCIÓN

Mediante la Resolución n.º 40391 del 20 de abril de 2016, el Ministerio de Minas y Energía adoptó la Política Minera Nacional, en la que se establece que “El objetivo fundamental es que la actividad minera, en todas sus escalas, se desarrolle de forma ordenada, incluyente, competitiva y responsable...”. Esta política destaca, entre otros, los siguientes aspectos:

- Los problemas que enfrenta el país en torno a la minería de pequeña y mediana escala son numerosos y disímiles.
- Se requiere generar herramientas y estrategias de apoyo a los mineros para que con ayuda del Estado formalicen su actividad y mejoren sus condiciones de vida.
- Existen altos niveles de ilegalidad e informalidad en la actividad minera.
- Es necesaria la articulación entre los diferentes estamentos del Estado para eliminar el uso de mercurio en la actividad minera.

Para abordar la situación descrita, la Política Minera Nacional establece, para la pequeña minería, entre otras, las siguientes líneas estratégicas:

- Apoyo para la regularización de la actividad minera.
- Asistencia técnica.
- Mejores prácticas para el fomento de la pequeña minería.
- Diálogo y coordinación con los gobiernos territoriales.
- Mecanismos de participación y diálogo para lograr condiciones de mutua confianza entre los actores involucrados en la cadena de valor de la minería.
- Apoyo para mejorar las condiciones de vida de las personas relacionada con la pequeña minería.

En este contexto, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), perteneciente al Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCCTI), adscrito al Ministerio de Minas y Energía, tiene por objeto, entre otras actividades, según el artículo 3.º del Decreto 4131 de 2011, realizar la investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo. Adicionalmente, estableció una serie de funciones enfocadas en el desarrollo de diversas actividades, entre las que se encuentran “generar e integrar conocimientos y levantar, compilar, validar, almacenar y suministrar, en forma automatizada y estandarizada, información sobre geología y recursos del subsuelo” e “integrar y analizar la información geocientífica del subsuelo”.

El Servicio Geológico Colombiano debe procurar el cumplimiento de sus objetivos y contribuir al desarrollo de las actividades contempladas en la Ley 1286 de 2009. Entre dichos objetivos cabe destacar la generación y el uso del conocimiento mediante el desarrollo científico, tecnológico y la innovación, como actividades esenciales para dotar de valor agregado a nuestros recursos, crear nuevas empresas basadas en investigación, desarrollo tecnológico e innovación, alcanzar mayores y sostenidas tasas de crecimiento económico, acumulación y distribución de riqueza, con el objeto de mejorar los niveles de calidad de vida de los ciudadanos.

En este mismo sentido, le corresponde a la Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano, en el marco del Decreto 2703 de 2013, “Por medio del cual se establece la estructura interna del SGC y se determinan las funciones de sus dependencias”, dirigir y realizar, entre otras, investigaciones asociadas con la caracterización, el procesamiento y la utilización de materiales geológicos.

Entre las funciones del Grupo de Trabajo de Caracterización y Procesamiento de Minerales y Carbones, según la Resolución 128 del 8 de marzo del 2017, se encuentran las siguientes:

- Desarrollar proyectos para la caracterización, el procesamiento y aprovechamiento de materiales geológicos (carbones y minerales), con énfasis en la promoción minero-ambiental.
- Realizar asesoría técnica en la caracterización, el procesamiento y aprovechamiento de carbones y minerales en la pequeña y mediana minería.

En el capítulo 7, numeral 7.2 del Plan Estratégico del Conocimiento Geológico del Territorio Colombiano (2014-2023), definido por el Servicio Geológico Colombiano, se establece, para la Dirección de Laboratorios,

la tarea de realizar investigaciones especiales, tales como la de beneficio de minerales y transformación de carbones, por lo que el laboratorio se concentra en la generación de estudios y el desarrollo de esquemas técnico-científicos, ambientalmente sostenibles, para el beneficio de minerales, como parte de la cadena de valor de la minería.

El Grupo de Trabajo Cali del Servicio Geológico Colombiano cuenta con una infraestructura tecnológica que incluye una planta piloto de beneficio de minerales, donada por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), que ha permitido la realización de estudios asociados al aprovechamiento sostenible de minerales auríferos, lo cual posibilita la verificación y proyección, a escala industrial, de las alternativas tecnológicas limpias para el mejor aprovechamiento de los recursos minerales.

La óptica mediante la cual trabaja la Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano para la sustitución del mercurio se define experimentalmente en la evaluación de las condiciones de las operaciones y los procesos metalúrgicos que correspondan, según las características mineralógicas de los depósitos.

En este contexto, entre el Servicio Geológico Colombiano y el Ministerio de Minas y Energía se suscribió el Convenio Interadministrativo GGC n.º 319 de 2018, que tiene por objeto “Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para identificar y analizar las características de los yacimientos y los procesos de beneficio asociados a esos yacimientos en cinco (5) distritos mineros, correspondientes a los departamentos de Cauca, Bolívar, Córdoba, y Antioquia, con el objetivo de realizar documentos técnicos que permitan orientar a la población minera frente a las operaciones de recuperación del mineral aurífero sin el uso del mercurio, en el marco de la Ley 1658 de 2013”.

Para el desarrollo del proyecto se ha contado con la participación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, mediante la suscripción del Convenio Especial de Cooperación 19 de 2018, y de manera específica, con la participación del departamento de Geociencias y el Grupo de Investigación Caracterización Tecnológica de Minerales, reconocido por Colciencias y dirigido por el profesor Juan Carlos Molano, para la evaluación mineralógica, metalúrgica y ambiental de depósitos minerales en el país. Mediante el desarrollo de las actividades técnico-científicas previstas en el citado convenio se han logrado obtener resultados básicos para la comprensión de la metalogénesis de los depósitos minerales del área de estudio, con actividades fundamentales, como el muestreo en campo, preparación de muestras, análisis instrumentales e interpretación de resultados. Cabe destacar los resultados obtenidos mediante la implementación de técnicas tales como la espectrometría de infrarrojo, espectrometría Raman, microsonda electrónica y microtermometría para el conocimiento de las inclusiones fluidas, que permiten dilucidar la paragénesis del depósito. También se suscribió el Convenio Especial de Cooperación n.º 25 de 2018, con la Universidad de Caldas, con el propósito de contar con información petrográfica requerida para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

La presente guía se realiza con el fin de establecer las características mineralógicas de la zona minera de Puerto Libertador (Córdoba), con miras a deducir y comprobar los procesos y operaciones geometalúrgicos, para aprovechar de manera óptima el recurso aurífero sin usar mercurio, como un aporte fundamental a las buenas prácticas en minería que ayudarán a contar con un sector organizado, legítimo, incluyente y competitivo.

---

**“Entre el Servicio Geológico Colombiano y el Ministerio de Minas y Energía se suscribió el Convenio Interadministrativo GGC n.º 319 de 2018, que tiene por objeto “Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para identificar y analizar las características de los yacimientos y los procesos de beneficio asociados a esos yacimientos en cinco (5) distritos mineros, correspondientes a los departamentos de Cauca, Bolívar, Córdoba, y Antioquia, con el objetivo de realizar documentos técnicos que permitan orientar a la población minera frente a las operaciones de recuperación del mineral aurífero sin el uso del mercurio”**

---

# 1. MARCO DE REFERENCIA

Panorámica del entable de la mina el Alacrán en el municipio de Puerto Libertador (Córdoba). Fotografía tomada por Oscar Cardona, Servicio Geológico Colombiano



# 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Puerto Libertador se encuentra en el distrito minero 22 y el 48,16% de su área cuenta con títulos mineros en proceso de legalización o en propuestas de contrato. La actividad minera del municipio incluye carbón, níquel, materiales de construcción, oro y plata; no ha habido producción de oro a nivel industrial. La minería de oro de aluvión se realiza dentro del cauce de los ríos San Pedro y San Jorge y en la quebrada El Salad (CMPL 2012). Las explotaciones artesanales e informales de oro se desarrollan principalmente en las veredas San Matías, San Juan y Mina Raa-William. Estas explotaciones se realizan desde hace más de treinta años, y es una labor heredada por varias generaciones. También existe gran cantidad de población migrante en busca de ingresos que hace parte de la población minera del municipio. La minería del oro es el principal motor de la economía, puesto que la mayor parte de la población se encuentra relacionada con la actividad minera de manera directa o indirecta.

El potencial minero del Puerto Libertador es prominente, ya que varias empresas de diversos commodities (materias primas minerales) realizan actividades de exploración y explotación, como el grupo Argos, por medio de sus filiales Argos (negocio cementero), Sator (negocio carbonífero), Tekia (negocio forestal) y la Central Térmica de Gecelca 3, que utiliza carbón sub-bituminoso para su operación. Pese a que no está en jurisdicción del municipio de Puerto Libertador, es pertinente mencionar un proyecto de interés regional (PIRE) que se ha desarrollado en el área de influencia durante más de 30 años, consistente en una mina de níquel de clase mundial: Cerro Matoso, del grupo South 32, empresa que ha solicitado y lleva a cabo exploración de cobre, dado el potencial que tiene el área con el proyecto San Matías.



Fotografía 11. Cocos para amalgamación. Fuente: autores.



Fotografía 1.2. Cateo de oro en mina. Fuente: autores.

En cuanto a la minería de oro, la gran mayoría de los trabajos mineros que se llevan a cabo en la actualidad son de subsistencia y de minería artesanal y pequeña minería (MAPE), encaminados a trabajar las mineralizaciones estrato-ligadas, vetiformes y zonas oxidadas con enriquecimiento supergénico que se trabajan a cielo abierto en pequeños tajos artesanales, y también de manera subterránea, buscando niveles enriquecidos que exhiban oro libre en cateos manuales (batea y pala). Las operaciones mineras se realizan con un bajo a escaso conocimiento técnico.

En la vereda San Juan se localiza la mina El Alacrán, en la cual el oro es minado de manera artesanal por la Asociación de Mineros de El Alacrán, con alrededor de ochenta mineros trabajando en treinta tajos someros a cielo abierto y algunos socavones, que procesan el material en numerosos molinos de bolas y californianos (véanse las fotografías). Pese a que los mineros artesanales no poseen derechos legales, tienen un acuerdo de buenas relaciones con la empresa Córdoba Minerals, que tiene los títulos mineros y permite los trabajos hasta que empiece la construcción (Kulla y Oshust 2018). Este es un PIRE llamado San Matías.

**Minado.** Los trabajos de MAPE no sobrepasan las 10 t/día de material trabajado. Por lo general el arranque de material se realiza con explosivos caseros (glucosa y clorato) o indugel, y se utilizan taladros neumáticos para la malla de explosivos. No hay ningún tipo de seguridad industrial, lo que se traduce en niveles muy elevados de exposición al riesgo en los tajos a cielo abierto.

**Beneficio.** La mayoría de las MAPE realizan un proceso de beneficio por amalgamación con Hg; no obstante, varias han empezado una reconversión utilizando solo procesos de concentración gravimétrica y fundición, como en el caso de la mina Pirita, que sin ninguna asistencia técnico-científica ha logrado esto gracias a la benevolencia de la mena.

## 1.2. DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD



Fotografía 1.3. Mercurio en batea para amalgamación. Fuente: autores.

El Estado colombiano, atendiendo a un claro compromiso con la preservación de la salud humana y por la mitigación de los impactos ambientales generados por el desarrollo de actividades mineras, en especial aquellas que no cumplen plenamente los estándares que rigen en la industria, ha venido adoptando un marco regulatorio cuyo propósito es cumplir con los mandatos y normas nacionales e internacionales orientados a la reducción y eliminación del uso del mercurio en la actividad industrial minera.

En el contexto expuesto se expidió la Ley 1658 del 15 de julio de 2013, “Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones”, norma cuyo alcance y propósito, entre otros, es la eliminación total del mercurio en el proceso de beneficio del oro, estableciendo un plazo máximo de cinco años, es decir, hasta el año 2018. Esto se logrará mediante la implementación de tecnologías limpias para la recuperación del oro, que sean más eficientes que las actuales y que definitivamente no requieran la utilización de mercurio en el proceso de beneficio, en especial en procesos de recuperación de metales preciosos.

Como complemento a ello, y bajo el liderazgo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en diciembre de 2014 se lanzó el Plan Único Nacional de Mercurio, que busca eliminar gradual y definitivamente el uso de mercurio en el sector minero e industrial de Colombia. Dicho plan fue adoptado y acordado entre los siguientes ministerios: Ambiente y Desarrollo Sostenible; Minas y Energía; Salud y Protección Social; Trabajo; Comercio, Industria y Turismo; Relaciones Exteriores; Agricultura y Desarrollo Rural; Transporte, y dos instituciones del sector de minas y energía: la Agencia Nacional Minera y la Unidad de Planeación Minero Energética.

El Plan Único Nacional de Mercurio se convierte en la ruta que debe seguir el Gobierno nacional para eliminar el uso del mercurio, e implica actividades de inspección, control, vigilancia y gestión de información, y se requiere que la industria minera que opera en todo el territorio nacional conozca dicha política. Se trata de un esfuerzo conjunto entre los distintos niveles de gobierno: el sector minero, el industrial, comercial, ambiental, el sector de la salud, del trabajo y la sociedad civil en general, para cumplir con los compromisos nacionales e internacionales que han sido establecidos en este sentido. Este plan establece lineamientos

claros para reducir y eliminar progresivamente el uso del mercurio en las actividades de minería en todo el territorio nacional, con plazo a julio de 2018, y en todos los procesos industriales y productivos con plazo a julio de 2023.

El Ministerio de Minas y Energía y sus entidades adscritas y vinculadas, entre ellas el Servicio Geológico Colombiano, trabajaron de manera coordinada en el diseño y concertación del “Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio de la actividad minera”, que se desarrolla con objetivos específicos que contribuyen claramente al cumplimiento de las metas establecidas en los cuatro grandes programas del Plan Único Nacional, a saber: Programa de Fortalecimiento Institucional; Programa de Gestión Ambiental, de Salud Pública, de Seguridad y Salud en el Trabajo, Sectorial Tecnológica y Social; Programa de Educación y Comunicación, y Programa de Gestión del Conocimiento-Investigación Aplicada.

En el marco del eje “Gestión del conocimiento-investigación aplicada” del “Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio en la actividad minera”, cabe resaltar los siguientes objetivos específicos:

- Ampliar, masificar y promover el uso de tecnologías limpias para la pequeña minería.
- Apoyar proyectos de investigación que generen nuevas técnicas para la recuperación de oro sin uso de mercurio.
- Documentar experiencias exitosas en transferencia de tecnología que permitan la eliminación del uso de mercurio en los procesos de beneficio de oro, pues estos se enfocan en la promoción de nuevas alternativas para la producción más limpia del oro.

De igual forma, en el marco del eje “Educación y comunicación” del “Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio en la actividad minera”, se busca que exista una concertación con las comunidades para producir el cambio partiendo de procesos de comprensión profunda relacionados con las temáticas técnicas. Para cumplir con ello, se destaca el siguiente objetivo específico, expresado en el Plan Estratégico: “Generar guías técnicas para la comunidad minera de cada región, con el fin de implementar el uso de tecnologías eficientes en el proceso de beneficio de oro sin utilizar mercurio”.

Dado lo anterior, los ejes del Plan Estratégico ya mencionados permiten formular y ejecutar proyectos que pueden aportar nueva información, valiosa y necesaria, para el entendimiento geometalúrgico y la optimización de los procesos de beneficio del oro sin utilizar mercurio. Esto es posible mediante la formulación e implementación de procesos verdes y ecoeficientes orientados a la mitigación del impacto ambiental, y que conduzcan a la disminución de condiciones potencialmente riesgosas para la salud humana, en el desarrollo de actividades mineras, en especial, aquellas asociadas con el beneficio del oro en las zonas mineras existentes en el territorio nacional.

En el diagnóstico levantado en campo, en las unidades de beneficio aurífero de pequeña escala que actualmente registra el Ministerio de Minas y Energía se identificaron las principales debilidades en materia de eliminación de uso de mercurio en que incurren los mineros, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Falta de conciencia sobre la problemática ambiental originada en el uso de mercurio, toda vez que realizan sus actividades mineras con limitada asistencia técnica y con poca planificación, lo que no permite mantener índices de productividad y de sostenibilidad adecuados. Esto de paso causa, entre otras cosas, deterioro ambiental, impactos negativos sobre los recursos naturales, riesgo directo para los operarios de las unidades productivas, e indirectos para las comunidades y ecosistemas aledaños. Esta problemática pone en riesgo la salud de la población, pues los vertimientos mezclados con sustancias contaminantes, como el mercurio, son descargados en las corrientes hídricas que surten de agua a los acueductos regionales.

**En el marco del plan estratégico se busca que exista una concertación con las comunidades para producir el cambio partiendo de procesos de comprensión profunda, relacionados con las temáticas geocientíficas e ingenieriles. Es por ello, que se propuso generar guías técnicas para la comunidad minera de cada región con el fin de implementar el uso de tecnologías eficientes en el proceso de beneficio de oro sin utilizar mercurio, partiendo del entendimiento geometalúrgico.**



Fotografía 1.4. Socialización del proyecto con los mineros de Puerto Libertador (Córdoba). Fuente: autores.

- Desconocimiento de alternativas de tecnologías más limpias para la recuperación del metal sin recurrir al mercurio.
- Desconocimiento científico, en particular acerca de las condiciones geoquímicas de los depósitos auríferos; las características geológicas, mineralógicas y metalogenéticas propias de cada una de las zonas y los distritos auríferos del país, incluyendo su asociación mineral, su paragénesis y la reactividad de los diferentes minerales asociados al proceso de beneficio. Por ello, la falta de información impide generar una metodología de beneficio más eficiente y adecuada, lo cual actualmente puede generar menores ingresos a los mineros y causar un mayor impacto ambiental.

Dadas las razones expuestas, el Estado y el Ministerio de Minas y Energía han reconocido la necesidad de fomentar alternativas tecnológicas de producción más limpia para los procesos de beneficio de oro que conduzcan a la eliminación del uso de mercurio en zonas mineras de producción activa. Para ello se requiere del conocimiento especializado de entidades y grupos de investigación reconocidos, y se estima que el Servicio Geológico Colombiano y algunas universidades son las instituciones idóneas para dar cumplimiento a los objetivos de este proyecto. Se propone, por tanto, la realización de dicho proyecto para generar conocimiento científico y tecnológico aplicado al mejoramiento productivo del beneficio de oro con tecnologías de producción más limpias, que prescindan del uso de mercurio en la pequeña minería de Colombia.

Los resultados de este proyecto quedarán consignados en un informe técnico y harán parte de la guía metodológica correspondiente. Esta valiosa información será compartida y socializada directamente entre la comunidad minera para motivar su aplicación e implementación, lo que permitirá que el conocimiento adquirido contribuya al entendimiento particular de la metalogénesis, la optimización de los procesos de beneficio del oro y la mitigación del posible impacto ambiental asociado a las actividades mineras.



Fotografía 1.5. Iglesia en Puerto Libertador (Córdoba). Fuente: autores.

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar la guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio en la zona minera de Almaguer (Cauca), con el fin de generar conocimiento geometalúrgico que permita el mejoramiento productivo del beneficio de oro en la pequeña minería en Colombia.

### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el reconocimiento geológico de la zona minera de Puerto Libertador (Córdoba) haciendo énfasis en zonas y estructuras mineralizadas y de extracción activa, para lo cual se recogerá información de dichas estructuras, se medirán datos estructurales y se tomarán muestras de roca.
- Realizar la caracterización química y mineralógica de la mena para identificar su composición, asociaciones minerales, texturas, tamaños de grano, metalogénesis y la existencia de oro en la veta, para establecer un adecuado beneficio del mineral aurífero.
- Llevar a cabo pruebas metalúrgicas para definir la efectividad de los procesos actuales de beneficio y, con base en la información de caracterización del depósito, proponer una ruta metalúrgica adecuada para el procesamiento y recuperación del oro.
- Realizar ensayos ambientales que permitan identificar los riesgos asociados a la toxicidad de relaves y plantear metodologías que posibiliten el control y la prevención de impactos negativos sobre el medio ambiente.
- Definir la viabilidad financiera y económica de la implementación de la propuesta de uso de tecnologías limpias para sustituir el mercurio en el proceso de beneficio de oro en la zona minera de Puerto Libertador.

## 1.4. ALCANCE

Esta guía metodológica propone procesos de producción más limpia, sin uso de mercurio, mediante alternativas tecnológicas que permiten un mejor aprovechamiento del mineral y una mayor eficiencia y productividad en las operaciones de beneficio, todo fundamentado en la profundización del conocimiento geológico, metalogenético, mineralógico, metalúrgico y físico-químico de los depósitos minerales que son aprovechados por las unidades de beneficio de la zona minera de Puerto Libertador y la aplicación de este conocimiento en los procesos de beneficio del oro, con el objeto de evitar el impacto sobre el medio ambiente. No obstante, se tendrán en cuenta los procesos metalúrgicos y operaciones unitarias utilizados actualmente por los mineros de la región, para finalmente proponer una ruta metalúrgica que permita un mejoramiento de los procesos productivos sin el uso de mercurio.

La guía comprenderá ocho capítulos: 1) Marco de referencia, 2) Metodología de trabajo, 3) Características de la zona, 4) Aspectos geológicos, 5) Aspectos mineros, 6) Aspectos metalúrgicos, 7) Aspectos químico-ambientales, 8) Ruta metalúrgica propuesta para la zona minera y 9) Estudio económico y financiero.

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Transporte artesanal para insumos sobre el río. Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano



## 2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El primer paso en la metodología de trabajo consiste en seleccionar la zona minera que se va a estudiar, luego se realiza la revisión de la documentación minera existente, de acuerdo con los diferentes distritos mineros definidos en Colombia; posteriormente se revisa la información geológico-minera de la zona estudiada. Este proceso tiene como propósito adquirir bases de conocimiento para realizar el trabajo de campo y el respectivo muestreo.

## 2.2. MUESTREO

Una vez se adelantaron las diligencias institucionales correspondientes, se realizaron varias jornadas de campo para adelantar el trabajo de reconocimiento geológico de la zona, revisión de los procesos de beneficio de oro y toma de muestras.

En terreno se realizó la toma de cuatro tipos de muestras:

1. Muestras de zonas mineralizadas: Muestras de roca en vetas y en zonas de respaldos.
2. Muestras en plantas de beneficios: Material de cabeza y material de salidas de las diferentes operaciones unitarias practicadas en el beneficio.
3. Muestras de relaves: Rechazos o colas provenientes de los diferentes procesos.
4. Muestras en sedimentos y quebradas: Este proceso tiene por objeto identificar los posibles elementos que están pasando al medio ambiente luego de la finalización del proceso de beneficio.

## 2.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Con base en las observaciones hechas en campo se realizó una definición de los análisis, pruebas y ensayos que se practicarían. Con este fin se procedió a preparar las muestras y a iniciar los análisis de petrografía, caracterización mineralógica y composición química. Este proceso condujo a realizar un diagnóstico mineralógico y metalúrgico, ya que son el pilar para desarrollar la propuesta de ruta metalúrgica eficiente y ambientalmente sostenible para aplicar en la zona.

Los procedimientos analíticos aplicados fueron los siguientes:

### Petrografía

- Análisis de la roca: Se seleccionó la muestra y se extrajo una fracción, a la que se le realizó el pulido, de 60 a 40 micrones (secciones delgadas pulidas) para realizar análisis con microscopio (petrográfico y de metalografía).
- Análisis mineralógico general: Se seleccionó la muestra, se pulverizó a un d80 de 1,4 mm para realizar el pulido del material particulado.
- Análisis mineralógico específico para oro: La muestra del análisis mineralógico general se pulverizó a un d80 de 300 micrones y se concentró para sustraer el oro y hacerlo visible al análisis petrográfico. El material se concentró y se montó sobre vidrio para realizar desbaste a 40-50 micrones. Posteriormente, este concentrado se pulió y se brilló para someterlo a un análisis petrográfico y metalográfico.

### Análisis químicos elementales

- Ensayo al fuego: Análisis de oro y plata por fundición de 30 gramos de muestra.
- Análisis de hierro, cobre, mercurio, plomo y zinc por espectrofotometría de absorción atómica.
- Análisis de azufre por el método gravimétrico.
- Análisis cualitativo de carbonato de calcio.
- Análisis de elementos por fluorescencia de rayos X

### Análisis ambientales

- Análisis de arsénico, cadmio, cromo, plata, mercurio y plomo por el método de diagnóstico de toxicidad de depósitos.
- Análisis de cianuro total por descomposición química de complejos y lectura con electrodo de ion selectivo para ion cianuro.

### Análisis metalúrgicos

- Ensayo de concentración gravimétrica - mesa Wilfley
- Concentración por flotación
- Cianuración

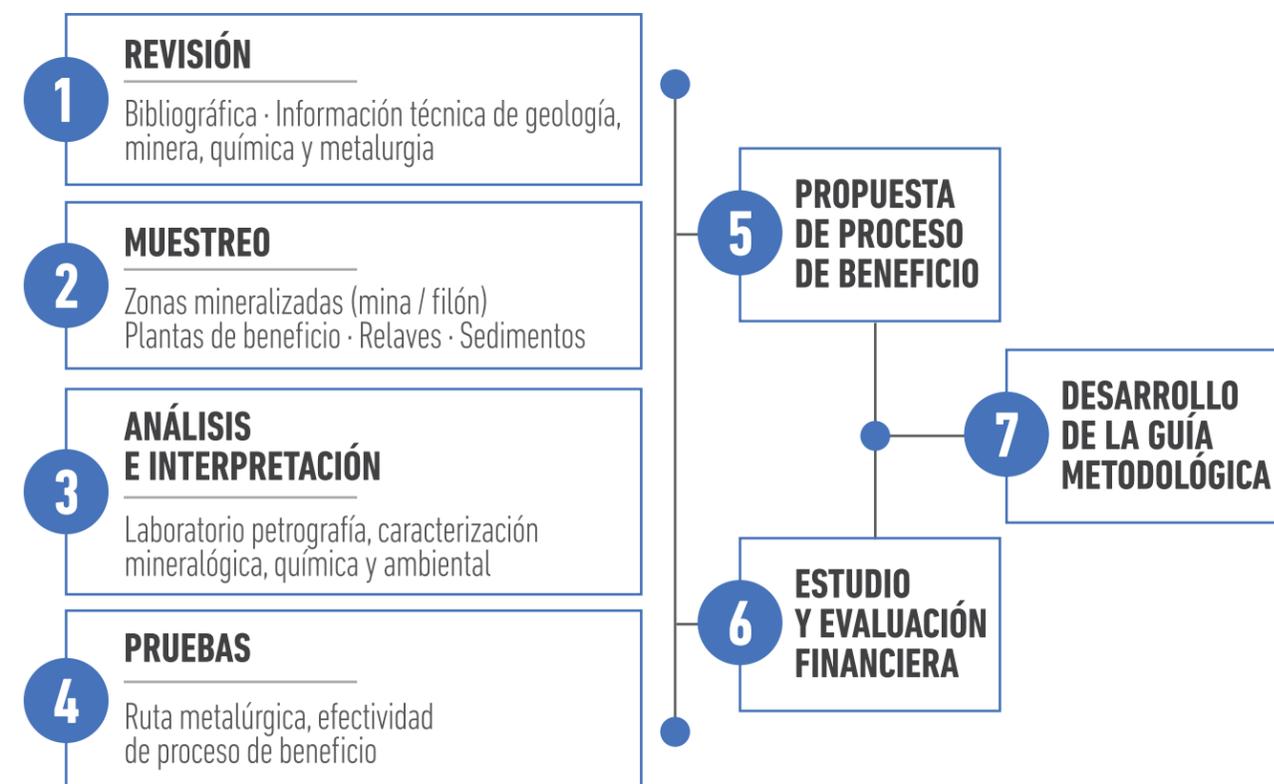
## 2.4. PRUEBAS

La interpretación de estos análisis dio lugar a la realización de las pruebas metalúrgicas correspondientes, las comprobaciones y confirmaciones para crear la propuesta de ruta metalúrgica óptima que se aplicaría.

## 2.5. PROPUESTA RUTA METALÚRGICA

Se definió una ruta metalúrgica adecuada para el proceso de beneficio de oro que optimizara todos los parámetros tecnológicos, que resultara beneficiosa en términos económicos para los mineros y que implicara la eliminación del mercurio en el proceso productivo.

Figura 2.1. Diagrama de metodología de trabajo. Fuente: autores.



### 3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Conocer las generalidades de la zona de estudio nos permite tener una referencia sobre la localización geográfica y un acercamiento a los aspectos económicos y sociales que se desarrollan en los municipios estudiados.

---

Imagen desde la orilla del río San Pedro rumbo a la mina Buenos Aires, una de las principales cuencas de la zona minera de Puerto Libertador. Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano

## 3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona minera se localiza en el municipio de Puerto Libertador, Córdoba, en las estribaciones de la serranía de Ayapel, en el extremo norte de la Cordillera Central. pertenece a la cuenca alta del Río San Pedro, en alturas que van desde los 100 m. s. n. m. en la confluencia de la quebrada San Matías y el río San Pedro, hasta los 1300 msnm en la parte sur de la cuenca, esta área comprende los depósitos minerales pertenecientes al distrito minero San Matías del Mapa Metalogénico de Colombia y corresponde con las planchas topográficas 92-II-A, 92-II-B, 92-II-C, 92-II-D, 92-IV-A y 92-IV-B a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Figura 3.1. Ubicación Geográfica del municipio de estudio. Fuente: autores.



## 3.2. MUNICIPIO DE PUERTO LIBERTADOR (CÓRDOBA)

**Localización:**  
7° 53' 53" latitud norte. 75° 40' 25" longitud oeste

**Extensión:**  
2.062 km<sup>2</sup>

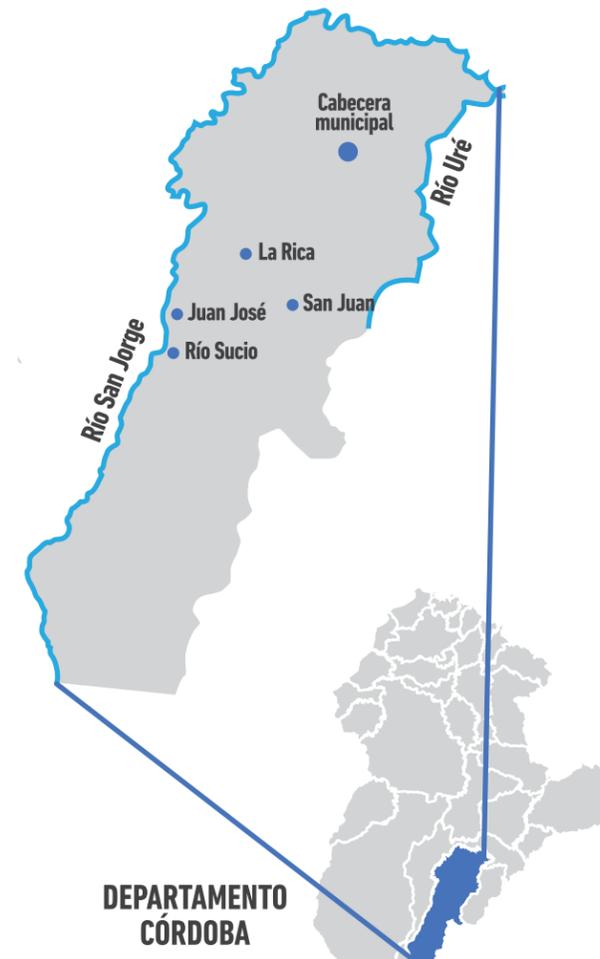
**Altitud de la zona urbana:**  
90 m. s. n. m.

**Temperatura promedio:**  
27 °C

**Límites:**

Al norte limita con el río San Jorge, que lo separa del municipio de Montelíbano; al sur, con el departamento de Antioquia; al oriente, con las quebradas Cristalina, San Antonio y Uré, que lo separan del municipio de Montelíbano, y al occidente, con el río San Jorge, que lo separa del municipio de Montelíbano.

Figura 3.2. Ubicación del municipio de Puerto Libertador. Fuente: autores.



**Economía:** Las principales actividades productivas del municipio son la ganadería, con un 41% de participación, seguido de la agricultura, con el 26%, y la conservación y extracción forestal, con 25 y 8%, respectivamente. Por su parte, las actividades urbanas, la explotación minera y los bosques de intervención representan menos del 1% del área explotada.

La explotación agrícola de la región se caracteriza por ser tradicional para el autoconsumo, dejando muy poco para la venta. Destacan la producción de plátano, cacao y papaya; como cultivos transitorios encontramos la producción de yuca, maíz y arroz.

El municipio ha venido sufriendo un cambio en su vocación agropecuaria por la explotación minera, debido a que cuenta con importantes reservas de minerales como el carbón, oro y cobre.

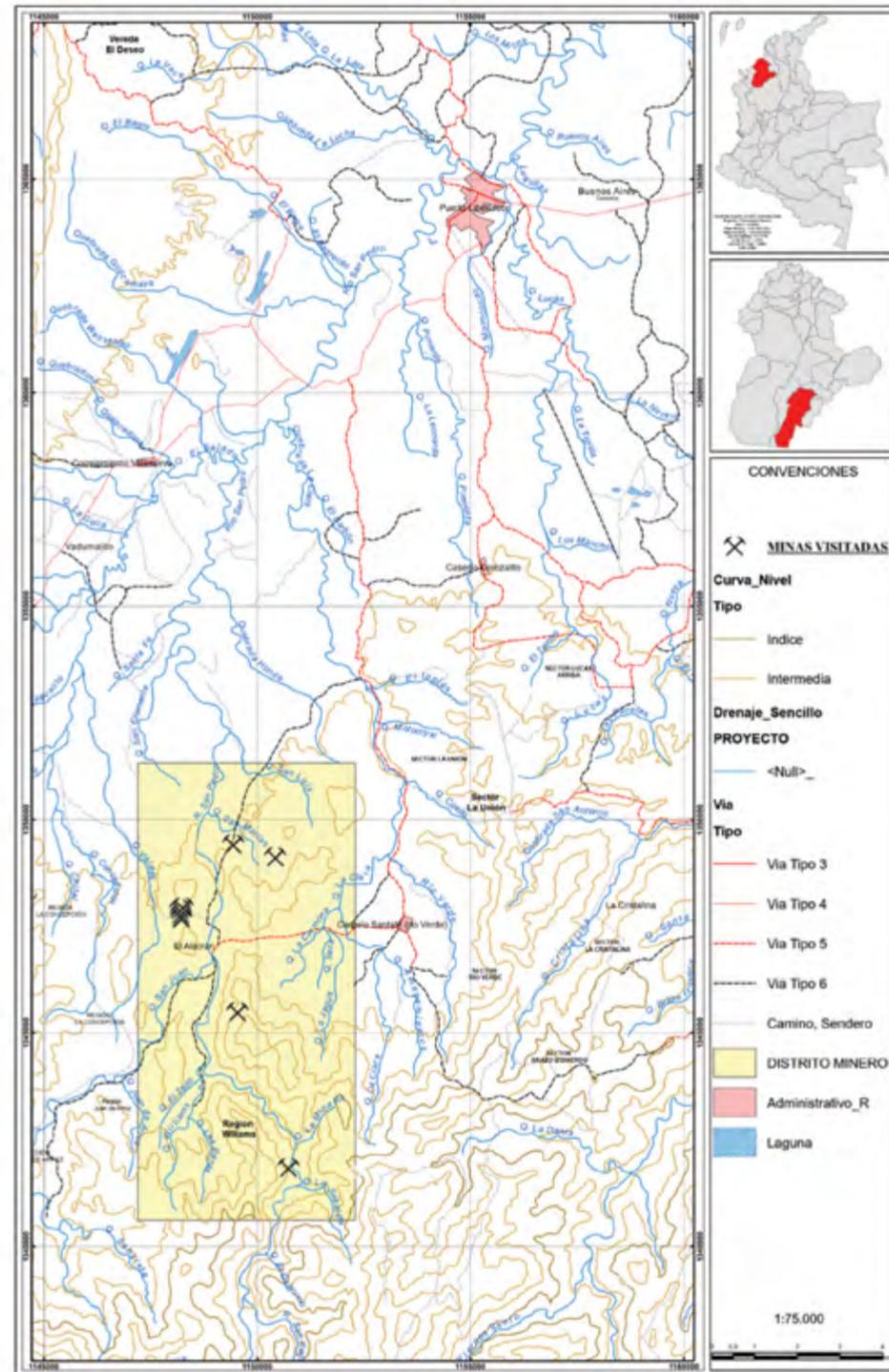
**Medio ambiente:** En el municipio de Puerto Libertador se encuentran bosques primarios y secundarios que se extienden desde el centro hacia el sur del municipio, aunque en su mayoría se encuentran intervenidos. La principal red hidrográfica está constituida por la cuenca alta del río San Jorge, que tiene como principales afluentes los ríos Sucio, San Pedro y San Juan. En gran parte, la estabilidad ambiental del municipio se está viendo amenazada por la práctica minera, realizada sin control para el sostenimiento, y que genera vertimientos de residuos potencialmente peligrosos y deforestación.

**Población:** De la composición étnica de Puerto Libertador cabe destacar la población perteneciente a las etnias indígenas emberá, katio y zenú, ubicadas en la parte alta del río San Jorge. Según las proyecciones de población del DANE para el año 2019, el total de la población es de 53.990 habitantes, divididos en la cabecera (21.690) y en la zona rural (31.564).

### 3.3. VÍAS DE ACCESO

Al área de estudio se accede desde la ciudad de Montería, por la vía Montería-Planeta Rica-Caucasia-Medellín. Tras llegar a la cabecera municipal de La Apartada se toma la vía La Apartada-Montelíbano-Puerto Libertador. De este último municipio se parte hacia el sur por vías terciarias hasta el caserío de San Juan Nuevo. Desde este punto se puede acceder a minas como El Alacrán y Raa.

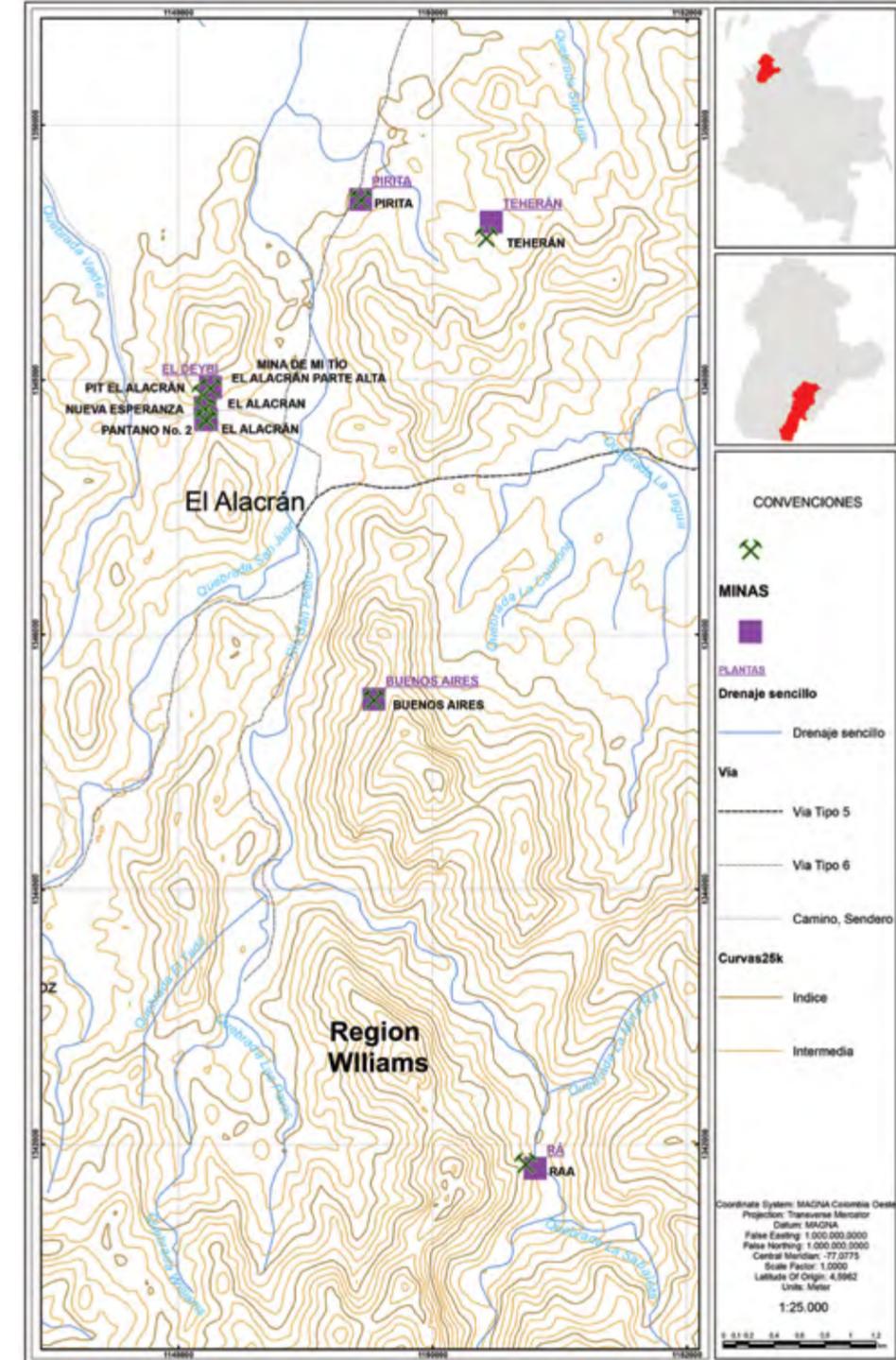
Figura 3.3. Localización de áreas mineras. Fuente: autores.



### 3.4. UBICACIÓN DE MINAS Y PLANTAS DE BENEFICIO

Las minas y plantas de beneficio visitadas se localizan en el municipio de Puerto Libertador, en las veredas San Matías, San Juan, Mina El Alacrán, La Jagua (Juan José) y Mina Raa.

Figura 3.4. Localización de minas visitadas en el municipio Puerto Libertador. Fuente: autores.



## 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

La composición mineralógica de los depósitos determina el comportamiento de las menas en los procesos de beneficio. Por este motivo es de gran importancia conocer desde su origen los procesos geológicos involucrados en la formación de estos, así como de las condiciones finales del depósito mineral. Teniendo en cuenta el origen y los procesos mineralizantes se puede establecer el tipo de depósito, particularmente aquellos de origen hidrotermal, característico de la zona estudiada. El capítulo pretende describir características mineralógicas obtenidas a partir de análisis petrográficos, de metalografía, análisis por microsonda electrónica (EPMA), espectroscopía infrarroja, espectrometría Raman y microtermometría de inclusiones fluidas que brindan información importante acerca de los procesos que condujeron a la formación de los minerales encontrados y que a su vez facilitarán la selección apropiada de procesos geometalúrgicos.

---

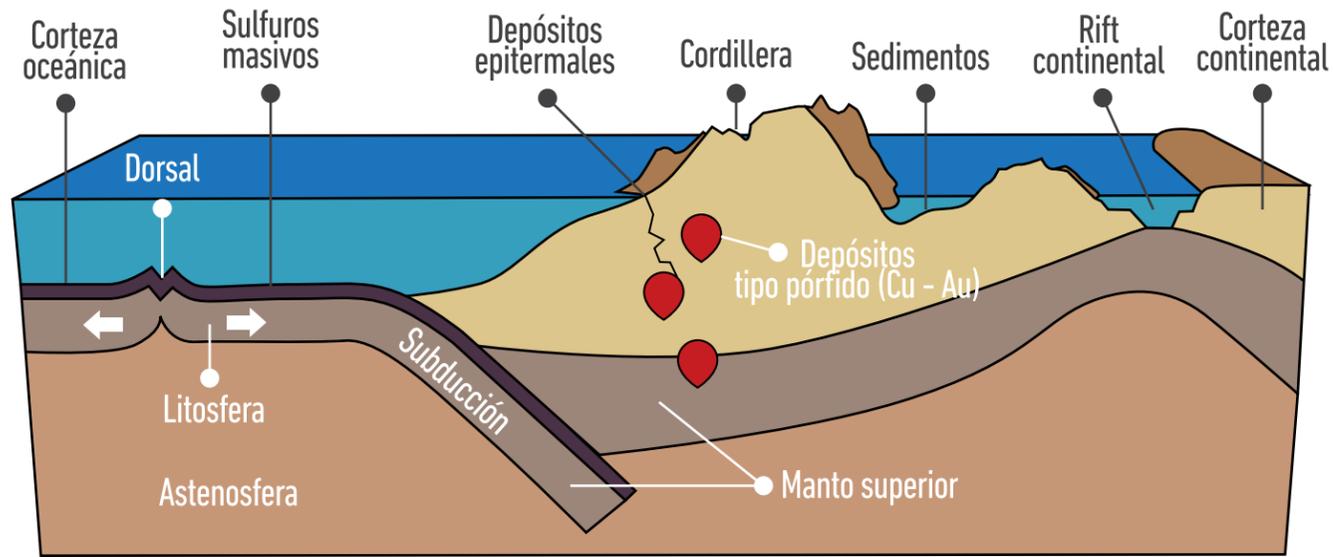
Colección de las muestras, alteración y sulfuros de la mina El Alacrán en Puerto Libertador (Córdoba). Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano



*Rite in the Rain*  
ALL-WEATHER  
GEOLOGICAL  
FIELD BOOK  
NF-540F

# 4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES

Figura 4.1. Depósitos auríferos y su relación con la tectónica de placas. Fuente: modificado a partir de Melgarejo J. et al., 1990.



La geología es la ciencia que estudia el origen, la composición y la estructura del planeta Tierra, así como la evolución y los procesos que la han modificado desde su origen (hace cerca de 4.600 millones de años) hasta el tiempo actual. La parte sólida está compuesta por rocas cuya composición es variada, dependiendo de la profundidad y de los procesos tanto internos como superficiales en los que interviene. El interior de la Tierra se ha diferenciado en tres capas concéntricas principales, según características establecidas especialmente por métodos geofísicos. Ellas son:

**Corteza.** Es la capa más externa de la Tierra, y en ella se encuentran concentrados los yacimientos minerales. Tiene una profundidad que oscila entre los 20 y 70 km bajo los continentes (corteza continental), y de 10 km bajo los océanos (corteza oceánica). La corteza oceánica es más densa que la corteza continental, y está compuesta principalmente por rocas básicas y ultrabásicas. La corteza continental en general está formada esencialmente por rocas y minerales silicatados y elementos litófilos, con afinidad por el oxígeno.

**Manto.** Es la capa intermedia. Está comprendida entre los 70 y 2900 km de profundidad. En esta capa, que generalmente se subdivide en manto inferior y manto superior.

**Núcleo.** Es la parte interna de la Tierra. Tiene una profundidad de 2.900 a 6.000 km. Se cree que en la parte interna el núcleo está formado por minerales metálicos siderófilos, como el níquel y el hierro.

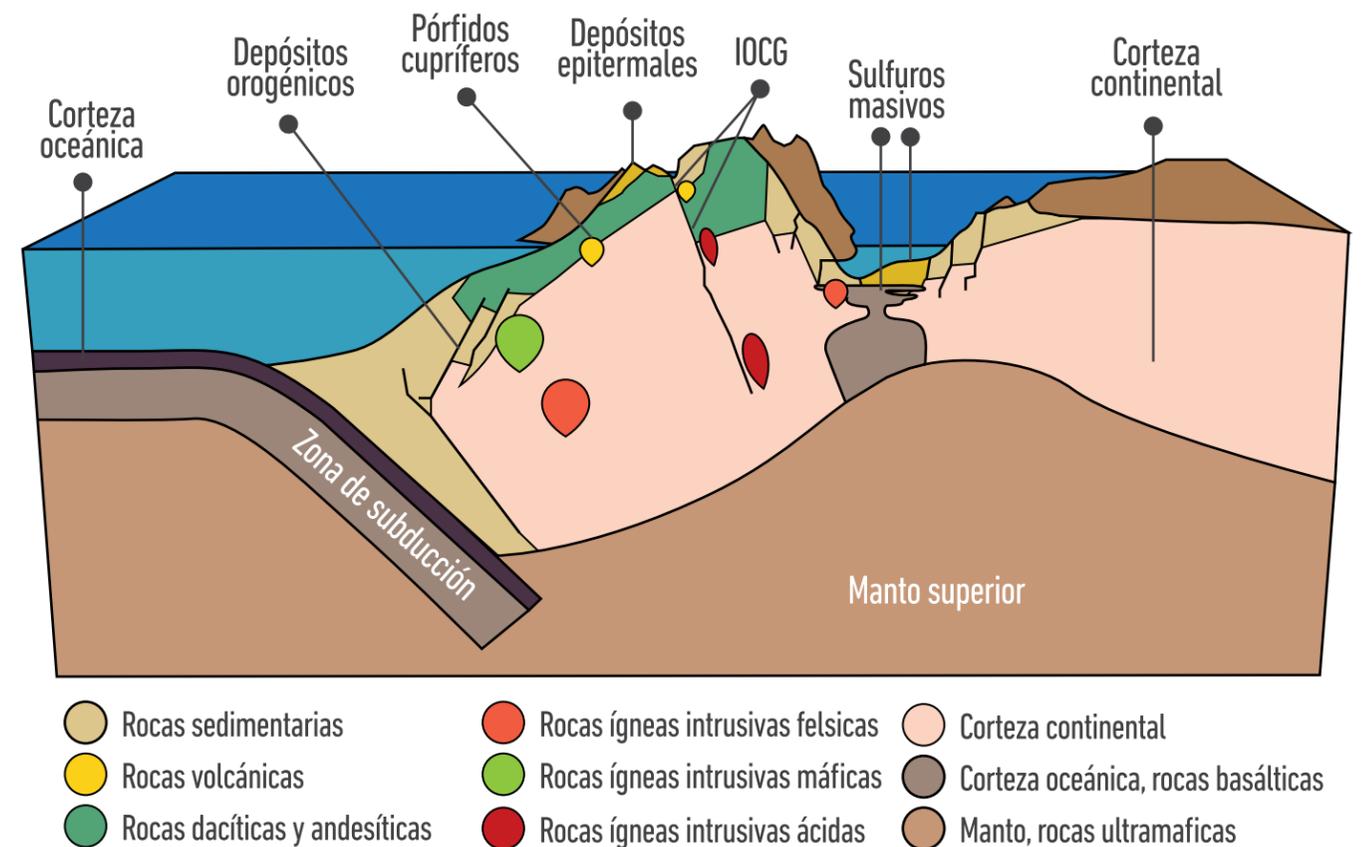
La dinámica de la Tierra se manifiesta con corrientes de convección formadas desde el interior del manto terrestre hacia la corteza, donde tiene lugar la ruptura de la corteza en fragmentos o retazos soportados en el manto superior a través de una zona denominada astenosfera.

La corteza se compone de placas o fragmentos móviles individuales, más o menos rígidos, que se desplazan e interactúan entre ellos, y que se conocen como placas tectónicas. En la dinámica terrestre se crea y se

destruye corteza continuamente. La creación o formación de corteza se produce en los límites divergentes de las placas tectónicas (dorsales oceánicas y rifts continentales). En los límites convergentes de las placas tectónicas, donde estas se mueven hacia un punto común, a veces una placa se hunde (subduce) debajo de otra; estas zonas, que se conocen como zonas de subducción, son responsables de la formación de grandes cadenas montañosas, como los Andes; además, son responsables de la generación de eventos sísmicos y del emplazamiento y acumulación de yacimientos minerales (sulfuros masivos, pórfidos y yacimientos epitermales de metales preciosos, entre otros). El origen de los depósitos minerales metálicos está estrechamente relacionado con ambientes asociados a la interacción de placas tectónicas (fragmentos de corteza terrestre) (figura 4.1).

## 4.1.1. GENERALIDADES DE YACIMIENTOS AURÍFEROS

Figura 4.2. Depósitos auríferos en ambientes compresivos de márgenes tectónicas activas. Fuente: modificado a partir de Lydon, 2007, en Godfellow, W. D. y Lydon, J. W. (2007).



- Rocas sedimentarias
- Rocas ígneas intrusivas felsicas
- Corteza continental
- Rocas volcánicas
- Rocas ígneas intrusivas máficas
- Corteza oceánica, rocas basálticas
- Rocas dacíticas y andesíticas
- Rocas ígneas intrusivas ácidas
- Manto, rocas ultramáficas

Un yacimiento mineral es la acumulación en superficie, o cerca de ella, de compuestos metálicos o no metálicos que, debido a su extensión, disposición o enriquecimiento, pueden recuperarse con beneficio económico. El oro es un metal precioso de color amarillo, brillo metálico, denso (19,3 g/cc) y blando (2,5-3 Mohs), muy apreciado por su belleza, utilidad y escasez; no se oxida ni pierde su lustre. Entre los metales conocidos se lo considera el más dúctil y maleable.

Desde el punto de vista geoquímico, se considera que el oro es un elemento con movilidad restringida; se transporta en soluciones acuosas a través de complejos clorurados y sulfurados. Los fluidos involucrados en este proceso reaccionan con las rocas circundantes y permiten la removilización del oro en fluidos que viajan a través de fracturas y poros.

Los cambios de presión, temperatura y reactividad geoquímica dan lugar a su precipitación. En los yacimientos minerales, el oro se asocia principalmente con elementos como la plata (Ag), el arsénico (As), antimonio

(Sb), mercurio (Hg), selenio (Se) y telurio (Te). En algunos depósitos se presenta asociado con hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu). El tamaño y tipo del depósito aurífero depende de los factores ya mencionados, así como de la magnitud del evento y el tiempo de ocurrencia.

La posición tectónica de Colombia es estratégica y privilegiada porque tiene una gran variedad de ambientes favorables para la formación de depósitos minerales; corresponde con márgenes convergentes o márgenes activos en los que tienen lugar la formación de montañas (cordillera de los Andes), actividad volcánica y sísmica y acumulación de minerales metálicos de Au, Cu, Pb, Zn, entre otros (figura 4.2).

A continuación se mencionan y describen las generalidades de los principales yacimientos auríferos del mundo que han sido descritos, y los que han sido reconocidos en el territorio colombiano, o que tienen potencial en el país, dada la diversidad de ambientes de formación de yacimientos que se presentan:

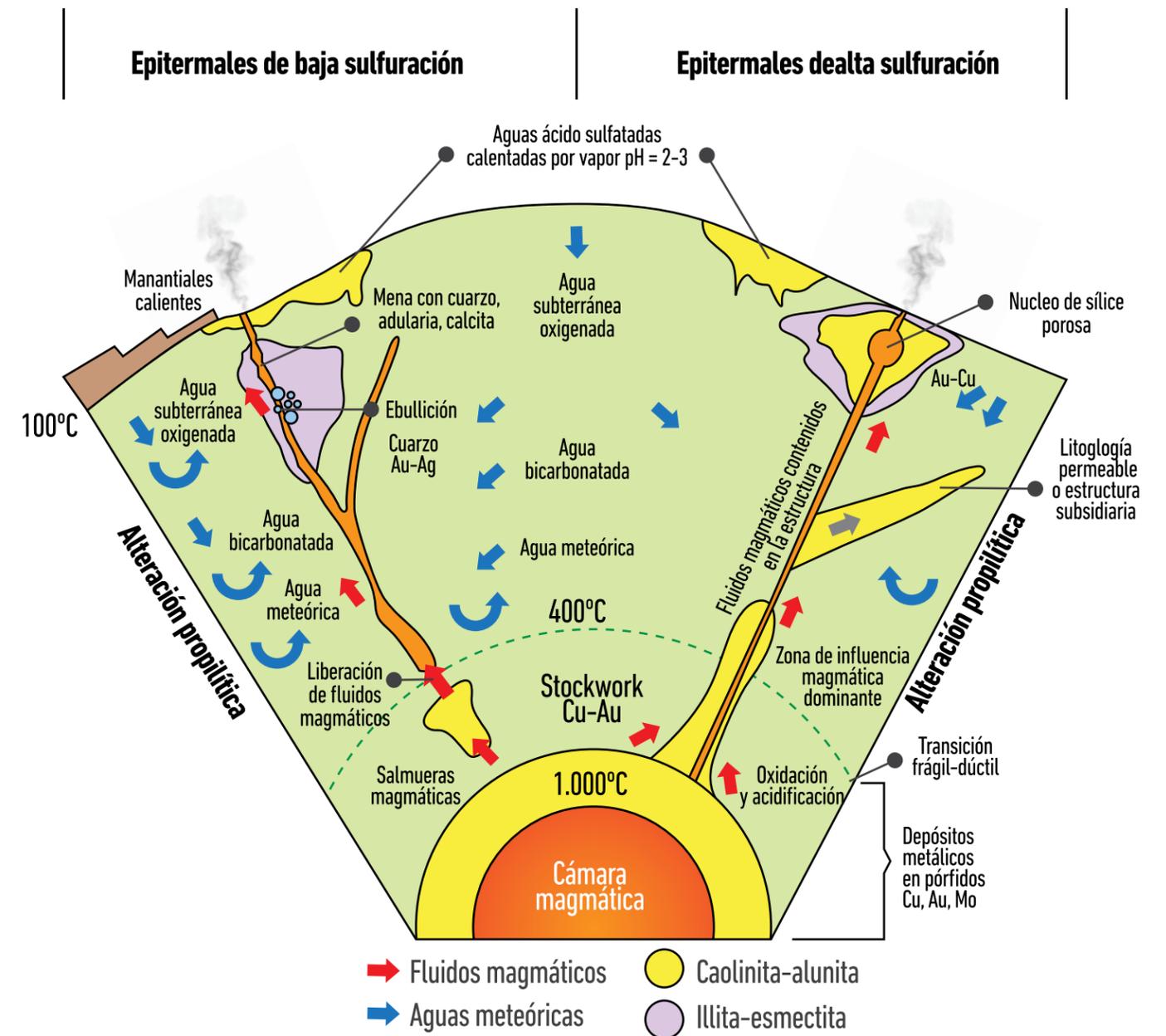
**Depósitos epitermales.** En este tipo de depósitos la mineralización de metales preciosos y de sulfuros asociados se produce a partir de fluidos hidrotermales calientes cargados de metales que se precipitan en las fracturas y fallas de las rocas encajantes (vetiformes) o en forma de diseminaciones formadas dentro de la roca caja, cuando se presentan las condiciones adecuadas de porosidad y permeabilidad. Los depósitos epitermales se forman a profundidades de entre 1 y 2 km medidos desde la superficie, y genéticamente se encuentran relacionados con ambientes de vulcanismo activo. La mineralización de yacimientos epitermales de metales preciosos puede formarse a partir de dos tipos de fluidos químicamente distintos: los denominados depósitos epitermales de baja sulfuración, que tienen un pH cercano a neutro, y los fluidos de alta sulfuración, que son más oxidados y ácidos. Los términos alta y baja sulfuración fueron introducidos por Hedenquist (1987), y se refieren al estado de oxidación del azufre; en los de baja sulfuración se presenta como  $S^{-2}$  en forma de  $H_2S$  (reducido), mientras que en los de alta sulfuración el azufre se presenta como  $S^{+4}$ , en forma de  $SO_2$  (oxidado). Se pueden destacar a escala mundial como depósitos epitermales de alta sulfuración los de Yanacocha (Perú) y El Indio (Chile); como depósitos de baja sulfuración se destaca Guanajuato (México). En Colombia, el depósito de Angostura, en la provincia minera de Vetas-California, corresponde al tipo epitermal de alta sulfuración (figura 4.3).

**Depósitos tipo pórfido (pórfidos auríferos y cobre-oro).** Estos depósitos se originan por el emplazamiento de cuerpos intrusivos subvolcánicos. Son yacimientos de baja ley (0,5 a 2 gramos por tonelada) y alto tonelaje, en los que ocurren eventos mineralizantes asociados a alteración hidrotermal (alteración potásica, alteración filica y alteración argílica). Con respecto a la mineralogía, en este tipo de depósitos se encuentra oro libre con partículas de algunos micrones, o como inclusiones en calcopirita, en bornita o en granos de pirita, que se presentan en estructuras de stockwork (estovercas o enrejados), en venillas o en diseminaciones. A escala mundial pueden citarse como ejemplos el depósito de Bajo la Alumbra (Argentina); La Coipa, cerro Casale y Marte/Lobo (norte de Chile) y Panguna (Papúa Nueva Guinea). De Colombia se pueden citar el depósito de La Colosa, en Cajamarca (Tolima, cordillera Central), Murindó (Antioquia) y Acandí (Chocó).

**Depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos-polimetálicos.** Este tipo de depósitos puede estar relacionado con el vulcanismo submarino que ocurre en las dorsales mesoocéánicas. En ellos, por procesos hidrotermales, las sucesiones estratiformes o lenticulares vulcano-sedimentarias que se acumulan se pueden enriquecer en metales como cobre, plomo y zinc, además del oro como subproducto. En Colombia, al occidente de la falla de Romeral, en la cordillera Occidental, se presentan ambientes de formación adecuados para la acumulación de este tipo de depósitos; actualmente se reconoce la mina del Roble (Chocó) como un depósito de sulfuros masivos, pero igualmente se destacan los prospectos del Dovio (Valle del Cauca) y Anzá (Antioquia).

**Depósitos orogénicos de oro.** Son depósitos auríferos formados en zonas de fractura o de cizalla, que se producen por el transporte de metales en fluidos de origen metamórfico. Las condiciones de formación corresponden a ambientes sometidos a grandes esfuerzos tectónicos, como lo que se dan en cadenas montañosas en crecimiento y deformación. El depósito orogénico consiste en numerosas venas de cuarzo en relleno de fracturas, con contenidos bajos de sulfuros, dispuestos generalmente en bandas, y con contenidos variables de Sb, Bi, Te y Hg. La arsenopirita es el sulfuro dominante, mientras que la pirita o la pirrotina se encuentran subordinados; el oro se encuentra asociado con estos sulfuros. Los filones pueden tener extensiones de varios kilómetros y se distribuyen según la disposición estructural de las rocas hospedantes. En Colombia pueden citarse como ejemplos de depósito tipo oro orogénico, la zona minera de Amalfi (An-

Figura 4.3. Modelo generalizado de formación de depósitos auríferos epitermales. Fuente: tomado de Camprubí et al., 2003.



tioquia), la mina El Vapor (Puerto Berrío, Antioquia) y la zona minera de Segovia (Antioquia), en la cordillera Central; de igual manera, en este trabajo, se reconoce que el yacimiento aurífero de la mina El Canadá, en La Llanada (Nariño), podría corresponder a un depósito mesozonal tipo orogénico (figura 4.4).

**Depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG).** Son depósitos auríferos formados en zonas de fractura o de cizalla de gran profundidad, que se producen por circulación de fluidos acuosos hipersalinos (>30% NaCl Eq) de alta temperatura de precipitación (500 °C). Están relacionados con la abundancia de magnetita-hematita y presencia de sulfuros de Fe y Cu y contenidos de carbonato, Ba, P o F. Se encuentran distribuidos a lo largo de la franja metalífera de los Andes chilenos; entre ellos sobresale el depósito de Candelaria.

**Depósitos de oro relacionados con intrusivos (intrusion related gold deposits).** Son depósitos auríferos que tienen un amplio rango de estilos de mineralización característicos espaciales, definidos a partir de un cuerpo magmático central. Depósitos de este tipo se han reconocido Fort Knox (Alaska) y la provincia de Tintina (Canadá). En Colombia, varios distritos mineros han sido inicialmente clasificados en este grupo, como el

Figura 4.4. Modelo general de depósitos auríferos de tipo orogénico. Fuente: modificado a partir de Goldfarb, Groves y Gardoll (2001).

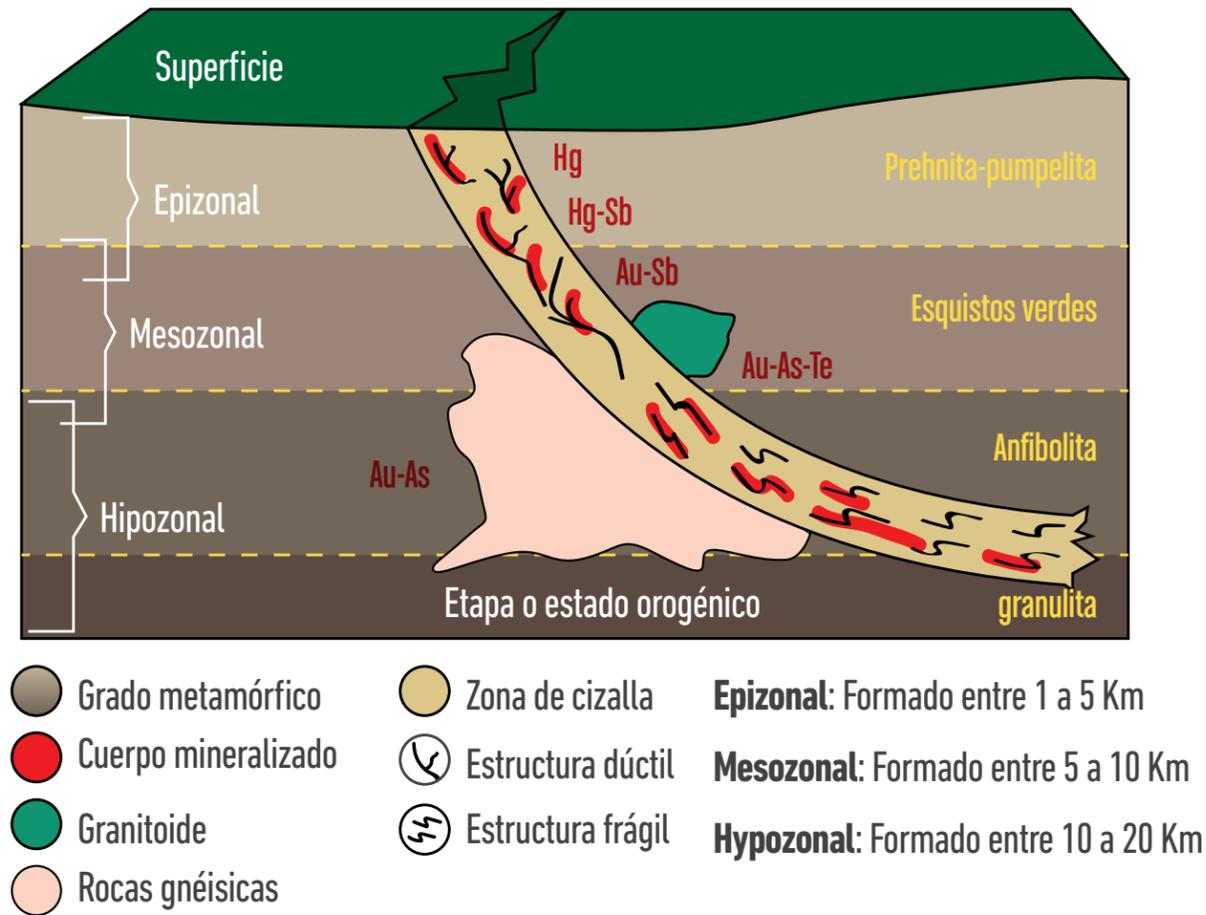
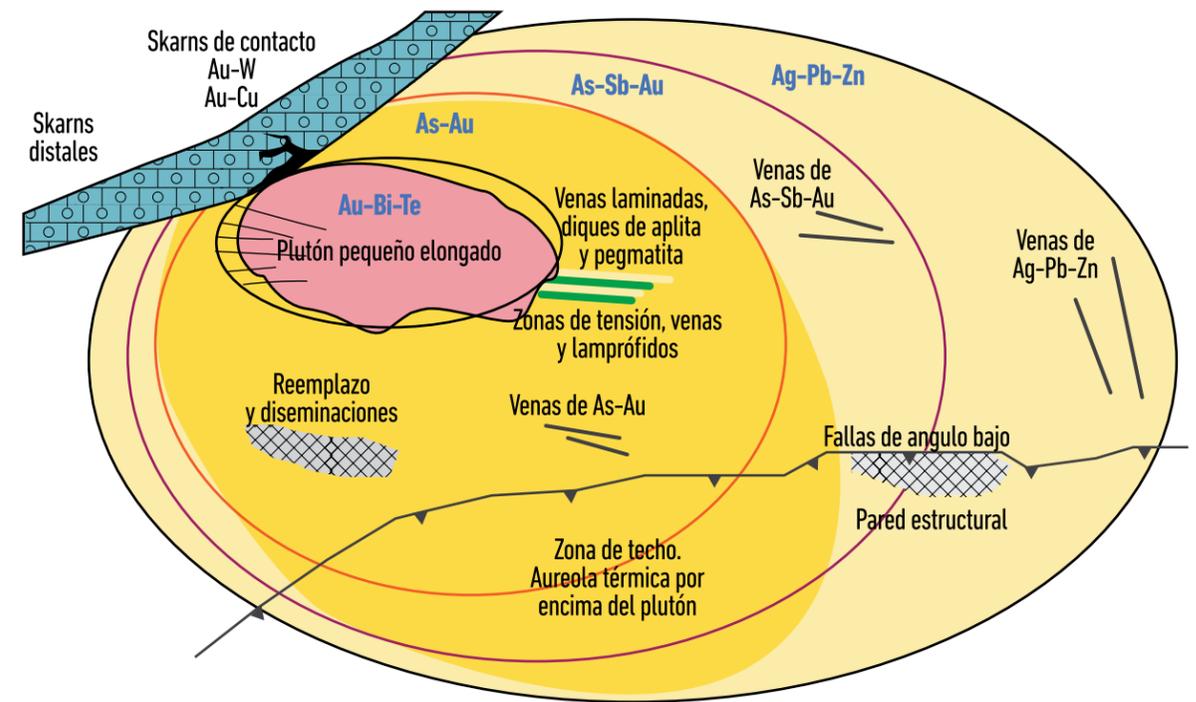


Figura 4.5. Modelo general de depósito aurífero relacionado con intrusivos (provincia de Tintina). Fuente: tomado de Hart et al. (2002).



depósito del cerro Gramalote (Antioquia) y el depósito de oro de la serranía de San Lucas (Bolívar) (Leal, Melgarejo y Shaw, 2011) (figura 4.5).

**Depósitos de placer (paleoplaceres y placeres auríferos recientes).** Se definen como depósitos minerales formados en superficie y que se acumulan por concentración mecánica, bien sea por corrientes aluviales, por corrientes marinas, en zonas lacustres o por procesos coluviales de partículas minerales pesadas (densas), que son inertes ante procesos oxidantes minerales y que proceden de fragmentos líticos meteorizados. En Colombia los placeres auríferos recientes son muy importantes en la producción de oro. Se destacan los distritos mineros del Bagre (Antioquia), bajo Cauca-Nechí; las cuencas de los ríos San Juan y Atrato (Chocó); río Naya (Valle del Cauca) y Ataco (Tolima), entre otros. Los paleoplaceres son depósitos de placer auríferos antiguos que fueron depositados en ambientes sedimentarios fluviales a deltaicos bajo condiciones reductoras (atmósfera pobre en oxígeno). En Colombia, las áreas más favorables para la existencia de paleoplaceres son depósitos de metaconglomerados con oro en la serranía de Naquén y Caranacoa (Guainía) y Taraira (Vaupés).

**Otros tipos de depósitos.** De acuerdo con la importancia o el potencial para Colombia, se puede destacar potencialidad en depósitos tipo skarn auríferos, en los que se presenta emplazamiento de plutones o de cuerpos intrusivos en rocas sedimentarias carbonatadas, donde se produce metamorfismo de contacto, metasomatismo y acumulación de depósitos de metales (sulfuros de cobre, plomo y zinc; magnetita, molibdenita y oro como subproducto). En Colombia se destaca como un área potencial Mina Vieja y El Sapo (Tolima), asociadas con las calizas de la Formación Payandé.

## 4.1.2. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES EN EL FRENTE DE MINA



### BOCAMINA

La entrada a una mina, generalmente un túnel horizontal.

### FRENTE DE MINA

Zona en la que se trabaja en la perforación y extracción del material.

### FILÓN

Relleno de una fractura con cuarzo, minerales metálicos y metales preciosos.

### SULFUROS METÁLICOS ENRIQUECIDOS CON ORO

### ROCA ENCAJANTE SILICIFICADA



## 4.1.3. SULFUROS ASOCIADOS A LA MENA



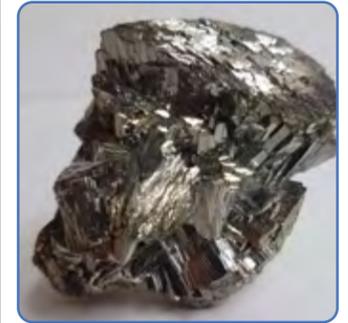
### Pirrotita - Po (pirita magnética)

Fórmula:  $Fe(1-x)S$   
Dureza: 3,5-4,5 Mohs  
Color: Bronce, marrón oscuro.



### Esfalerita - Sp (sulfuro de zinc)

Fórmula:  $ZnS$   
Dureza: 3,5-4 Mohs  
Color: varía entre amarillento y gris



### Arsenopirita - Aspy (sulfuro de arsénico)

Fórmula:  $FeAsS$   
Dureza: 5,5-6 Mohs  
Color: blanco a gris



### Calcopirita - Cp (mena de cobre)

Fórmula:  $CuFeS_2$   
Dureza: 3,5-4 Mohs  
Color: amarillo latón.



### Pirita - Py (sulfuro de hierro)

Fórmula:  $FeS_2$   
Dureza: 6-6,5 Mohs  
Color: amarillo latón.



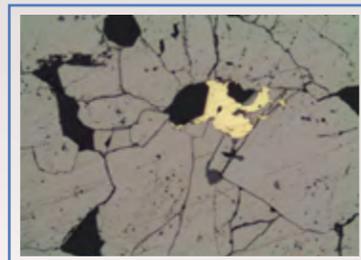
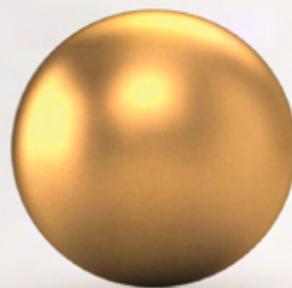
### Galena - Gn (mena de plomo)

Fórmula:  $PbS_2$   
Dureza: 2,5 Mohs  
Color: gris plomo

Sulfuros comúnmente encontrados asociados en las menas auríferas. Fotografías tomadas de <https://lorenminerals.com>.

## OCURRENCIA DE ORO EN LA MENA

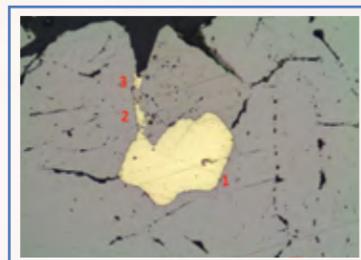
indica la forma, tamaño y estructura como se presenta el oro en la mineralización



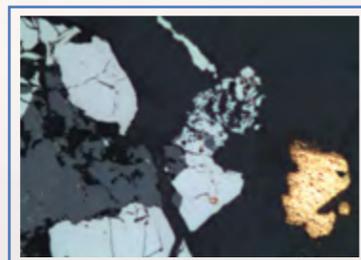
Oro asociado a pirita y cuarzo.



Oro libre.



Oro incluido en pirita y rellenando fracturas.



Oro incluido en arsenipirita y libre.

## 4.2. GEOLOGÍA DEL DISTRITO MINERO DE PUERTO LIBERTADOR (CÓRDOBA)

La zona de Puerto Libertador hace parte de un bloque tectónico limitado por las fallas Cauca-Almaguer, al oriente, y por la falla del Sinú y el cinturón plegado de Sinú-San Jacinto, al occidente, correspondiente a una cuenca sedimentaria cuyo basamento está conformado por una secuencia de rocas de corteza oceánica compuesta principalmente por rocas máficas, ultramáficas, tobas vulcanoclásticas y rocas sedimentarias marinas que hacen parte de la unidad lito-tectónica de San Jacinto (Leal, 2011). Se extiende hasta el extremo sur de la cuenca de Mompós, donde desaparecen las cordilleras Central y Occidental bajo una cubierta de rocas sedimentarias y depósitos aluviales. Las rocas exhiben topografía ondulada, con rasgos de poca elevación e intensa laterización debida a las condiciones climáticas de selva tropical lluviosa (Ingeominas, 2012) (figura 1).

Las rocas de afinidad oceánica pertenecen al denominado grupo Cañasgordas (formaciones Barroso y Penderisco), se encuentran adosadas a un basamento de afinidad continental de rocas sedimentarias pelíticas paleozoicas del grupo Cajamarca a lo largo del sistema de fallas Cauca-Almaguer (Londoño y González, 1997) (Gómez, Montes, Nivia y Diederix, 2015: 5-05).

### 4.2.1. GEOLOGÍA LOCAL

La geología del distrito minero, localizado al sur de Puerto Libertador, se reconoce por el afloramiento de numerosos cuerpos ígneos de composición calco-alcalina concentrados en áreas con alta densidad de fracturamiento y fallamiento, los cuales se hallan emplazados en rocas volcánicas basálticas y vulcanoclásticas.

Los cuerpos ígneos intrusivos porfiríticos expuestos en superficie y reportados en núcleos de perforación se clasifican en conjuntos (suites magmáticas) (Kulla y Oshust, 2018). Composicionalmente varían entre cuarzodioritas, dioritas, tonalitas, granodioritas y cuarzomonzonitas. De ellas se diferencian la suite magmática de Betesta-mina Escondida, la suite magmática de San Matías-La Jagua, la diorita de El Alacrán Norte y la diorita de El Alacrán Oeste (Redwood, 2011, 2013).

En el sector de El Alacrán afloran andesitas y basaltos con texturas porfiríticas, compuestas esencialmente por fenocristales de plagioclasa y augita. Asimismo, afloran sucesiones vulcanoclásticas de aglomerados y brechas volcánicas con fragmentos que superan los 5 mm de largo, capas de tobas cristalinas y líticas, intercaladas con limolitas y lodolitas, donde se presentan localmente niveles calcáreos con registro fósil. También es regular la aparición de brechas y tobas riolíticas y dacíticas con masas de cristales de cuarzo y feldespatos alcalinos (Kulla y Oshust, 2018). En detalle se han definido informalmente tres unidades.

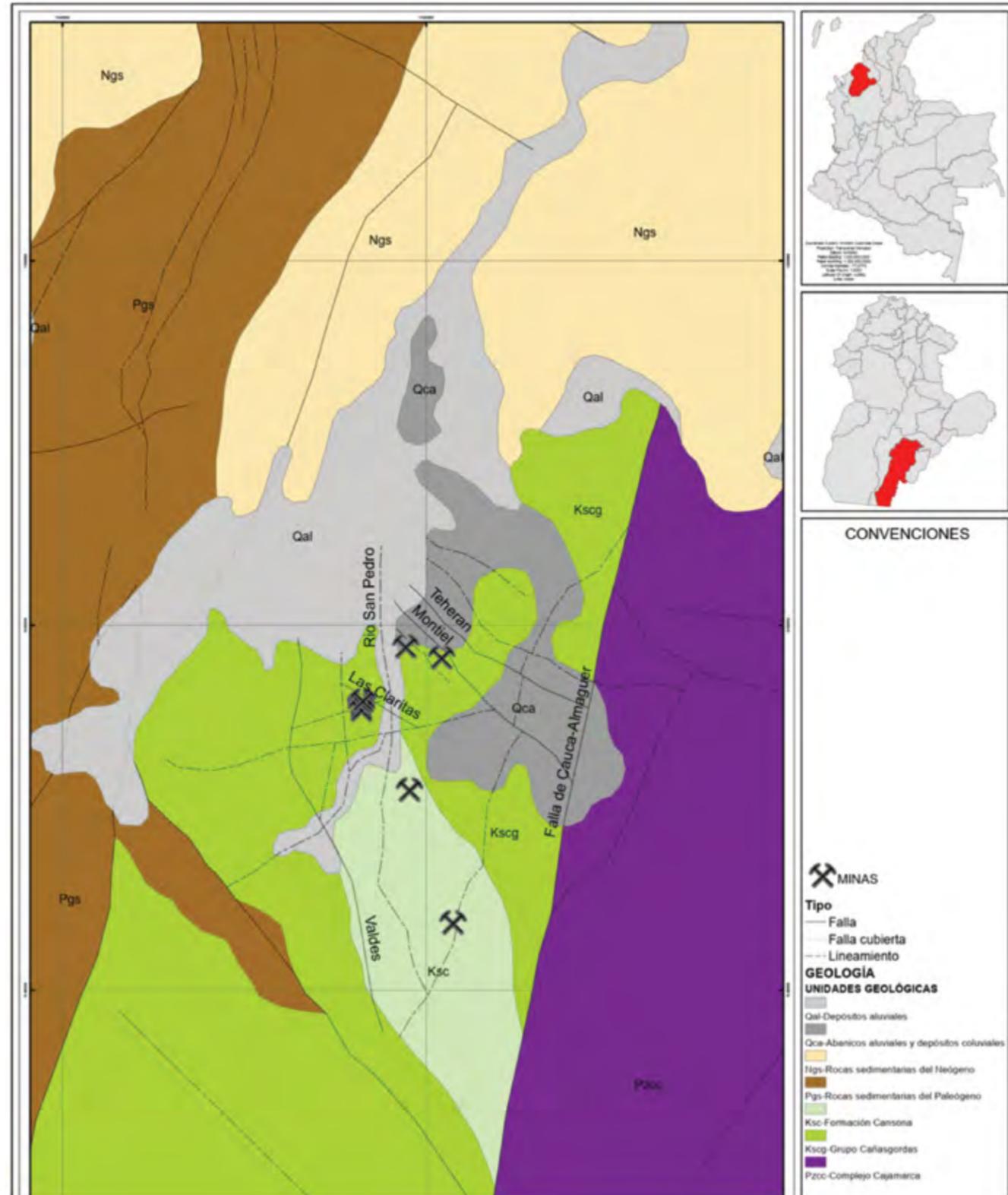
### 4.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La disposición estructural del área está dominada por dos sistemas de fallas regionales principales:

Un sistema con dirección predominante NNE-SSW, al que pertenece el sistema de fallas Cauca-Almaguer (fallas Santa Rita, Sabanalarga y Valdés), que marca el límite entre unidades afines a la corteza oceánica (basaltos, gabros y rocas ultramáficas intercaladas con bloques de chert, calizas y litoarenitas-lodolitas—grupo Cañasgordas—), con esquistos y génesis de complejos Cajamarca de corteza continental (Maya y González, 1995). Entre ellos se mencionan los lineamientos de los ríos San Pedro y La Concepción, de tendencia general N-S.

Entre los sistemas de fallas principales se desarrolla una serie de lineamientos locales con dirección principal WNW-ESE de mayor intensidad y asociados principalmente al sector minero de El Alacrán y mina Ra. Corresponden a fracturamiento posmineral que desplaza los paquetes litoestratigráficos mineralizados (Kulla y

Figura 4.6. Mapa geológico generalizado del área de Puerto Libertador.. Fuente: modificado a partir de Ingeominas, planchas geológicas 387, Bolívar, y 364, Timbío.



Oshust, 2018). Correspondientes a esta segunda tendencia estructural de dirección NW asociada a zonas de apertura que facilitan el emplazamiento de los diferentes cuerpos intrusivos aflorantes se hallan las fallas de Teherán, Montiel y Las Claritas.

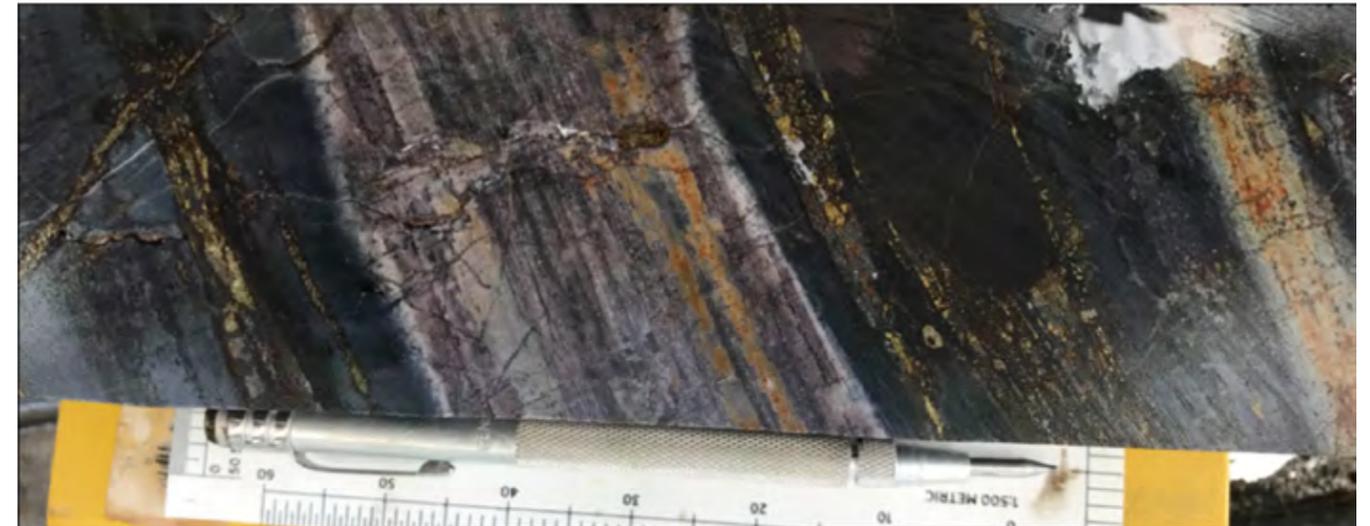
### 4.2.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

Los procesos mineralizantes que han dado lugar a la presencia de oro involucran la alteración de las rocas hospedantes en diferentes fases o etapas. La primera es la alteración sódico-cálcica representada en la asociación albita-actinolita, observable en la zona de El Alacrán; le sigue en importancia la alteración propiética con presencia de carbonatos clorita epidota y pirita, que se concentra hacia los bordes de los filones y hacia las partes externas de las zonas mineralizadas. La alteración hidrotermal característica para cada mina visitada es como sigue:

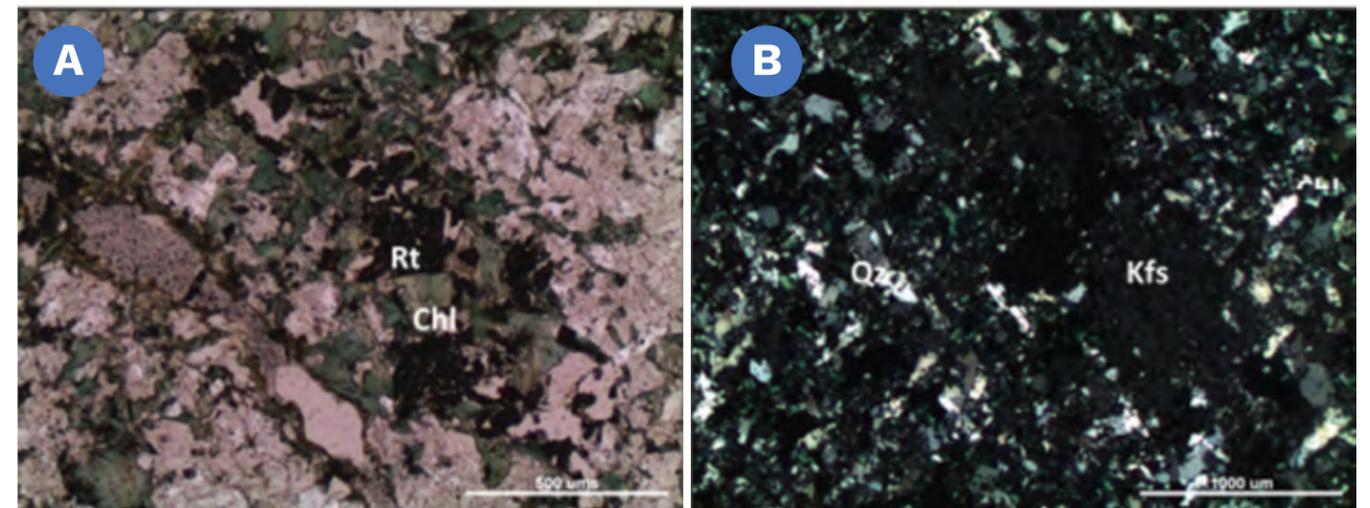
#### 4.2.3.1. MINA EL ALACRÁN

La alteración hidrotermal predominante corresponde a sódico-cálcica representada en la asociación albita-actinolita (algunas veces reemplazada a magnetita), de distribución penetrativa estratigráficamente controlada e intensa, incluyendo silicificación (cuarzo y/o sílice), carbonatación, sericitización, epidotización

Fotografía 4.1. Tobas estratificadas con alteración de sódico-cálcica, carbonatación, piritización y sericitización mineralización de calcopirita y pirita, El Alacrán. Fuente: Autores.



Fotografía 4.2. Alteración hidrotermal en El Alacrán. A) Clorita relacionada a rutilo. B) Clorita diseminada. Fuente: Autores.



y piritización diseminada, que se observa en la secuencia sedimentaria, las rocas volcánicas y los diques dioríticos.

En la parte exterior de la secuencia mineralizada predomina una alteración propilítica definida por la asociación de clorita-epidota-pirita-calcita y finalmente carbonatación y silicificación (fotografía 2). En la parte alta de El Alacrán, en la que predomina la meteorización, dominan los óxidos de hierro y sus intercambios generando parches y niveles de hematita especular, musquetovita-goethita-jarosita; en profundidad hay niveles de rocas vulcano-sedimentarias afectados por silicificación que llegan a la cornubianoización.

#### 4.2.3.2. MINA TEHERÁN

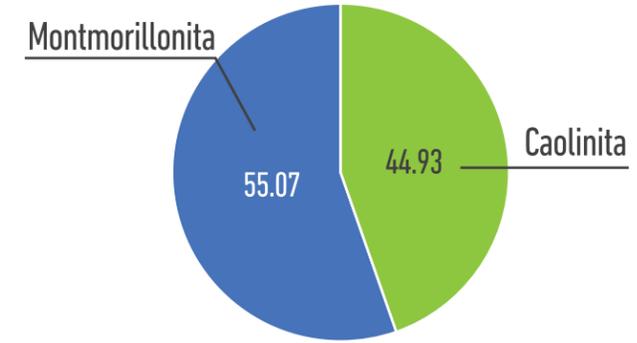
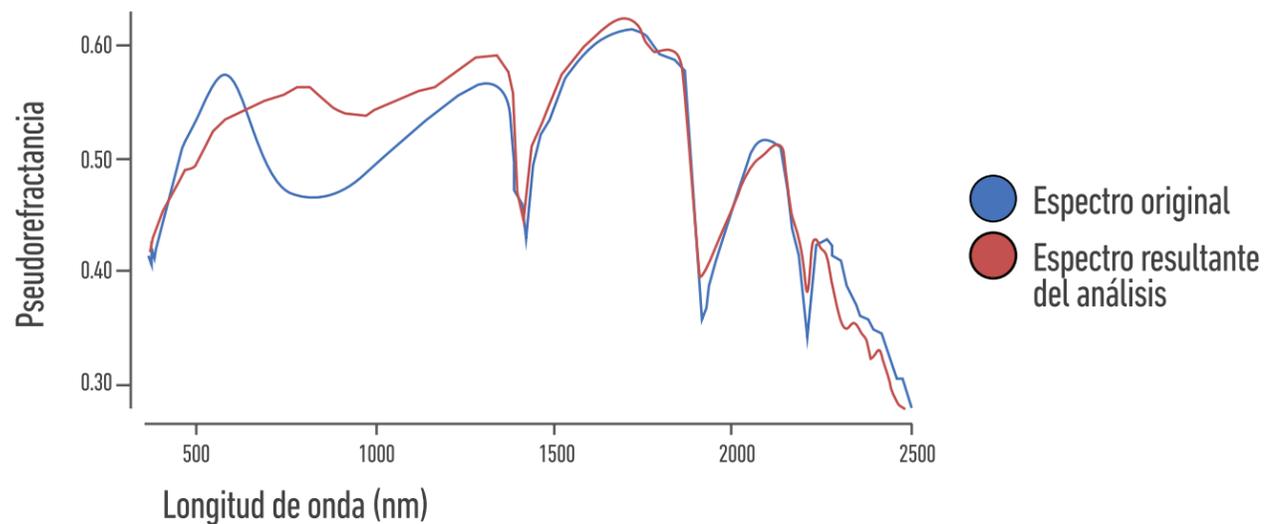
La roca presenta dos tipos de alteraciones: una argílica, al sur de la operación minera, con minerales como montmorillonita-caolinita-clorita, y otra de clorita-epidota, en el centro de los trabajos. (Fotografía 4.3).

Fotografía 4.3. Rocas con alteración argílica en la mina Teherán. Fuente: Autores.



Los análisis mineralógicos por espectrometría infrarroja indican contenidos altos de caolinita y montmorillonita característicos de este tipo de alteración.

Figura 4.7. Análisis IR para arcillas mina Teherán, Puerto Libertador. Fuente: autores.

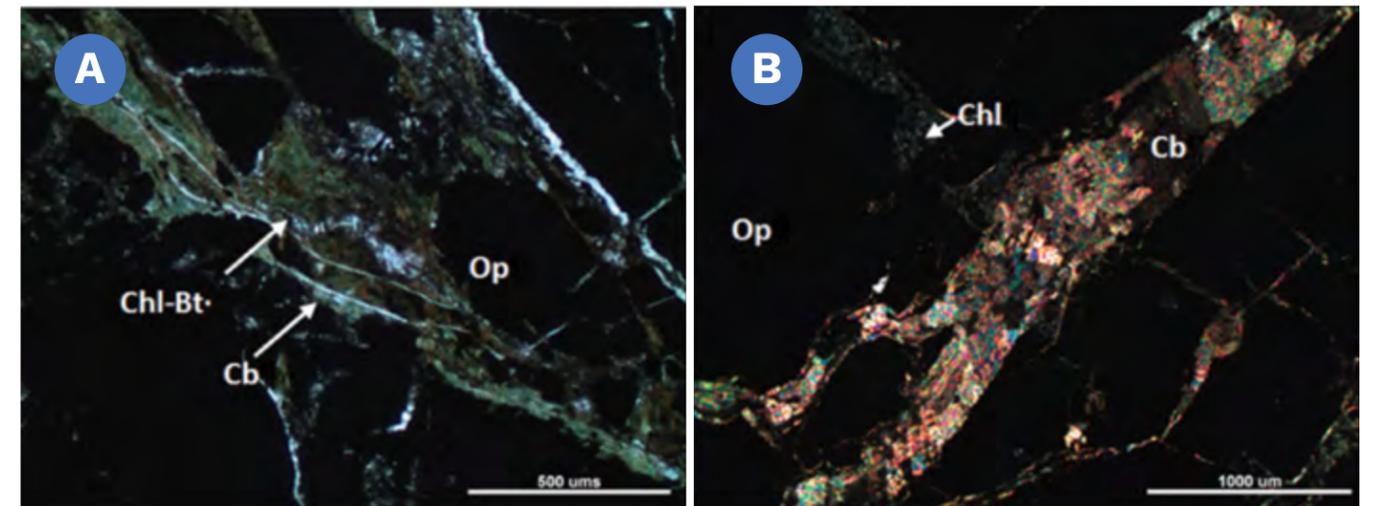


#### 4.2.3.3. MINA PIRITA

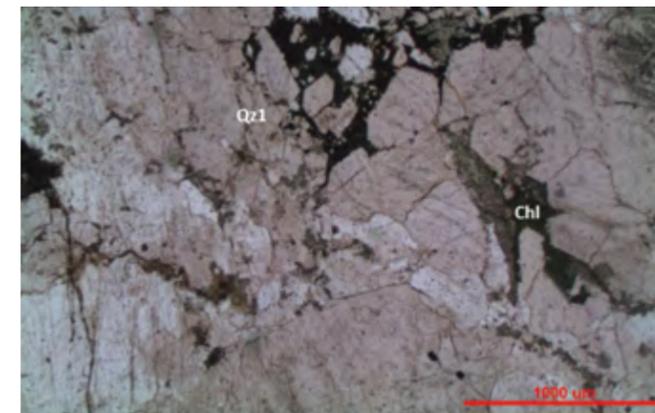
La roca de caja exhibe una fuerte alteración hidrotermal con silicificación y cloritización, de color gris verdoso 5G 6/1; el protolito ígneo proviene de una roca de grano fino volcánica de composición máfica. La mineralización ocurre de manera vetiforme en bandas de calcopirita y pirita masiva adyacente a una zona de gouge en zonas de fracturamiento, lo cual puede indicar relleno a lo largo de una falla de rumbo.

En la mina Pirita hay vetillas de clorita (Chl) y biotita secundaria (Bt Sec) que cortan y brechan los minerales de mena (Op); también, se observaron finas vetillas de carbonato (Cb) cortando a la asociación de clorita-biotita secundaria (Fotografía 4.4).

Fotografía 4.4. Alteración hidrotermal en vetillas en la mina Pirita: A) vetillas de clorita. B) Vetillas de carbonato. Fuente: Autores.



Fotografía 4.5. Ganga de Cuarzo y clorita en las fracturas de la veta de mina Raa. Fuente: Autores.



#### 4.2.3.4. MINA RAA

Predomina la alteración hidrotermal representada por sílice y clorita en la veta y sus alrededores. El protolito de la roca hospedante es difícil de reconocer precisamente por la intensa alteración adyacente a la mineralización (Fotografía 4.5).

## 4.2.4. METALOGÉNESIS Y MINERALIZACIÓN AURÍFERA

El distrito minero pertenece a la subprovincia Sinú-San Jacinto de la provincia metalogénica Andina Occidental (SGC, 2016). En la zona de Puerto Libertador se presentan varios estilos de mineralización aurífera, que, de acuerdo con su predominio, pueden diferenciarse en dos grupos:

El primero consiste de rellenos en zonas de cizalla, zonas de brecha, zonas tabulares estrato-confinadas y zonas de mineralización diseminada; la mena está compuesta por magnetita-pirita-calcopirita encajadas en tres clases de roca: tobas volcánicas con alteración calco-sódica y carbonatización, como en el caso de las minas de El Alacrán: rocas máficas basálticas en la mina Buenos Aires, y rocas porfiríticas andesíticas, como en la mina Teherán.

El segundo grupo corresponde a una mineralización predominantemente filoniana con vetas bien conformadas, en zonas de cizalla de espesor variable de hasta de un metro, con magnetita casi ausente y compuestas por minerales metálicos como pirrotina-calcopirita-pirita y cantidades menores de galena y posibles telururos de plata. Vetas masivas se hallan encajadas en rocas ígneas volcánicas máficas y andesíticas. A este grupo pertenecen las minas Pirita y Raa.

Para el área en general, la mineralización aurífera está relacionada con menas de óxidos de hierro y sus intercambios minerales por reacciones de óxido-reducción, como la recristalización de pirrotina-pirita a partir de magnetita (martitización) o fenómenos de formación de magnetita a partir de hematita (mushketovitización).

### 4.2.4.1. CARACTERÍSTICAS METALOGENÉTICAS DE EXPLOTACIONES

Las características metalogenéticas de explotaciones tradicionales y artesanales que actualmente tienen actividad minera son las siguientes:

#### Minas de El Alacrán

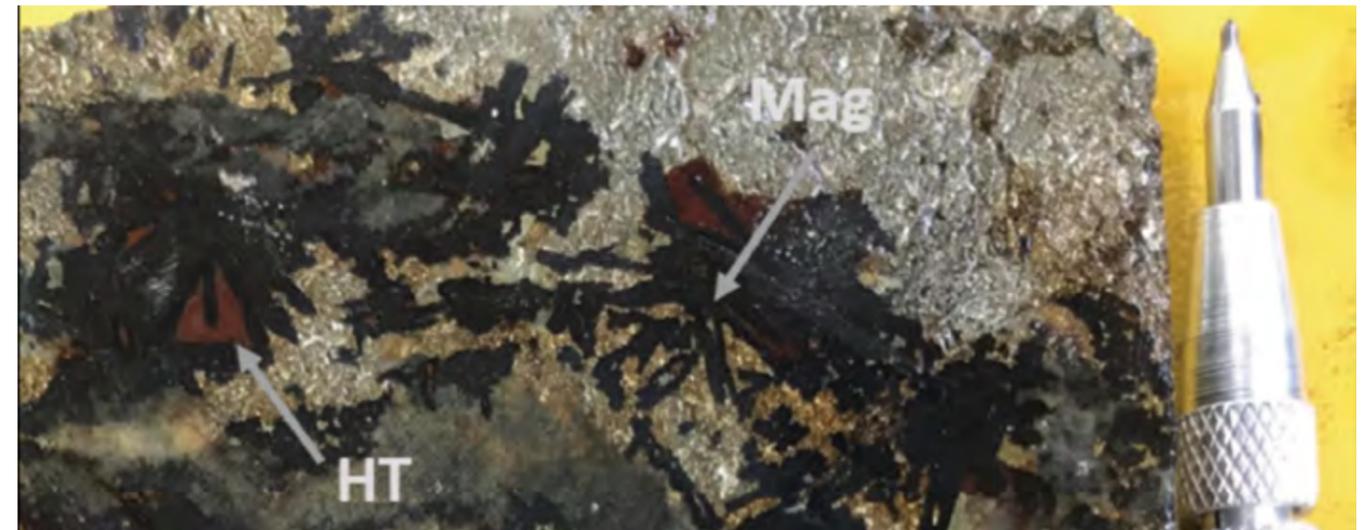
El Alacrán puede ser descrito como niveles mineralizados, con zonas de bonanza (ore shuts) de alta ley para Cu-Au, en forma de mantos, controlados estratigráfica y estructuralmente, que forman varios cuerpos (orebodies) discontinuos, con decenas de metros en el sentido NS y profundidades calculadas de hasta 350 metros (Kulla y Oshust, 2018); el potencial está abierto a profundidad. La mineralización viene precedida por fenómenos de reemplazamiento y recristalización magnetita-hematita masivas o por reemplazamiento de actinolita (Fotografía 4.6). Los mantos son de sulfuros masivos calcopirita, calcosina y pirita (Fotografía 4.7). En los alrededores, y a profundidad, se presentan estructuras vetiformes, como en las explotaciones de Nueva Esperanza y Pantano n.º 2.

Cuarzo y calcita están generalmente asociados con la mineralogía que domina la ganga, y en la mena, además de los sulfuros de cobre y hierro, hay una íntima asociación con óxidos de hierro, como magnetita y hematita con intercrecimientos e inclusiones (Fotografía 4.8).

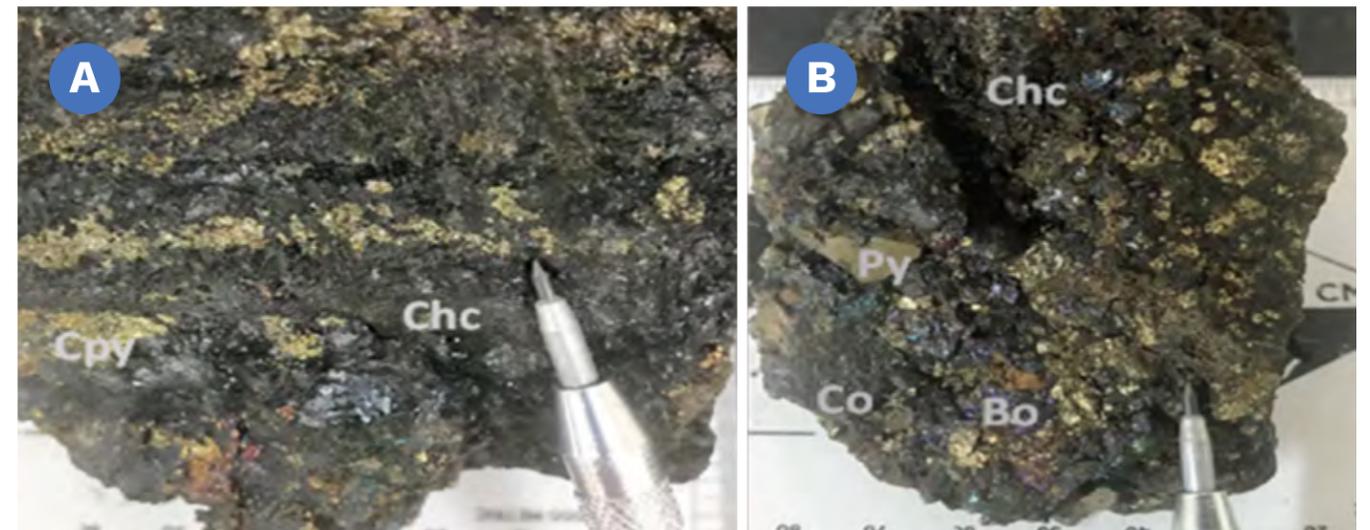
Las asociaciones mineralógicas predominantes, establecidas inicialmente a nivel macroscópico y comprobadas con análisis petrográficos y metalográficos en varias secciones pulidas, tienen las siguientes paragénesis (Fotografía 4.8):

- Pirita-magnetita-Pirrotina-Hematita
- Pirita-magnetita-calcopirita
- Pirita-calcopirita-esfalerita
- Pirita-magnetita-Calcita
- Calcita-silice

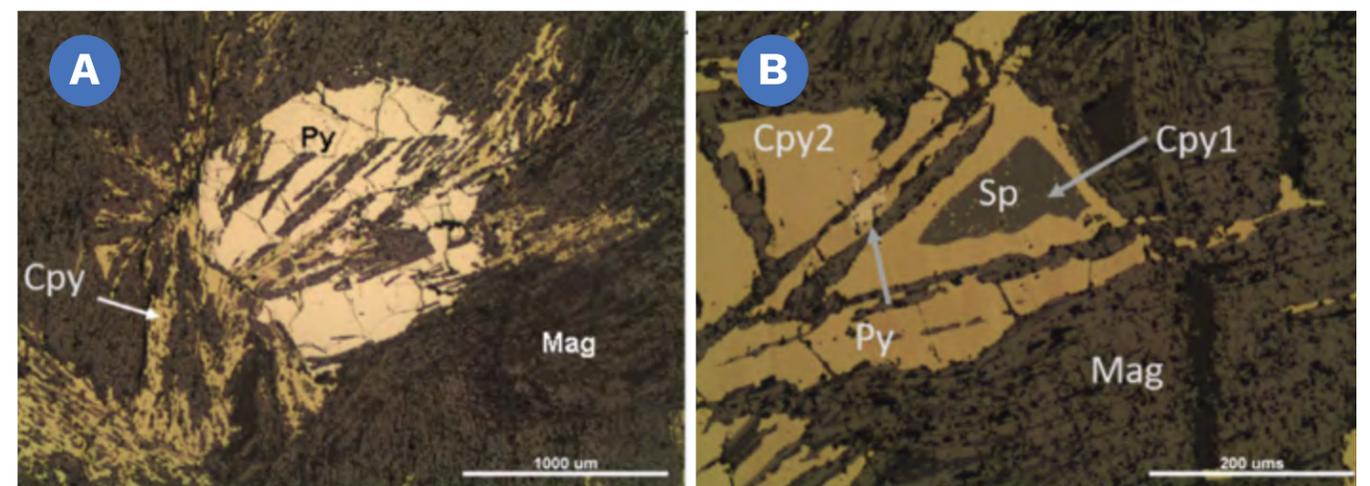
Fotografía 4.6. Magnetita a partir de actinolita y hematización de la misma, El Alacrán, Puerto Libertador. Fuente: Autores.



Fotografía 4.7. Sulfuros masivos calcosina (Chc) y calcopirita (Cp) y minerales supérgenos bornita (Bo) y covelina (Co). Mina El Alacrán. Fuente: Autores.



Fotografía 4.8. A) Magnetita (Mag) pseudomorfo de hematita (Hm) especular intercrecida con Cpy cortando Py-PR 2x. B) Mag intercrecida con Cpy2, asociada a Sp con exsolución de Cpy1. Mina El Alacrán-Pantano 2. Fuente: Autores.

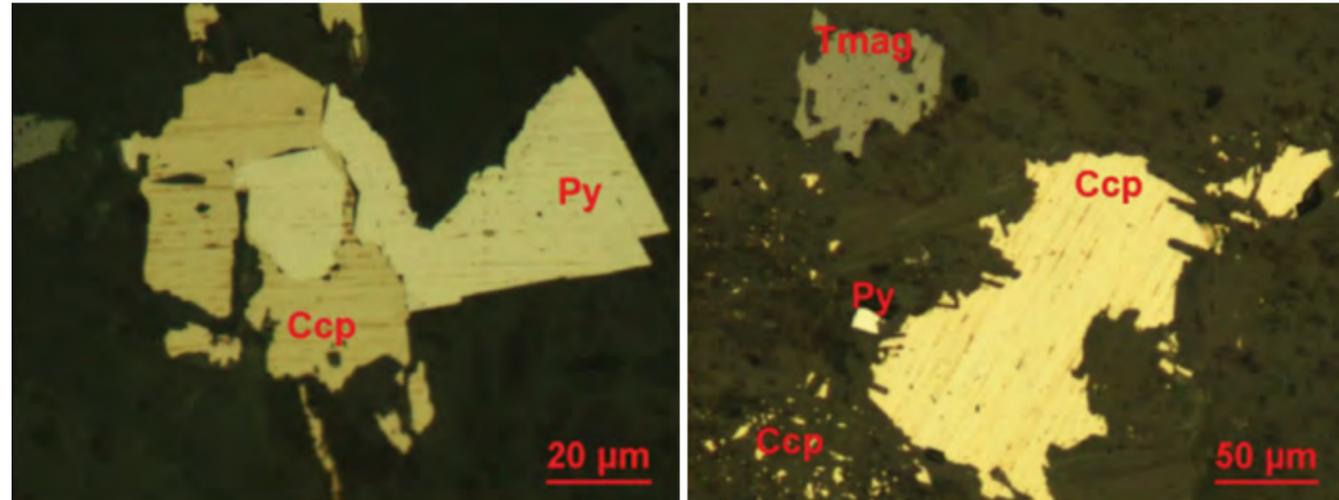


## Mina Buenos Aires

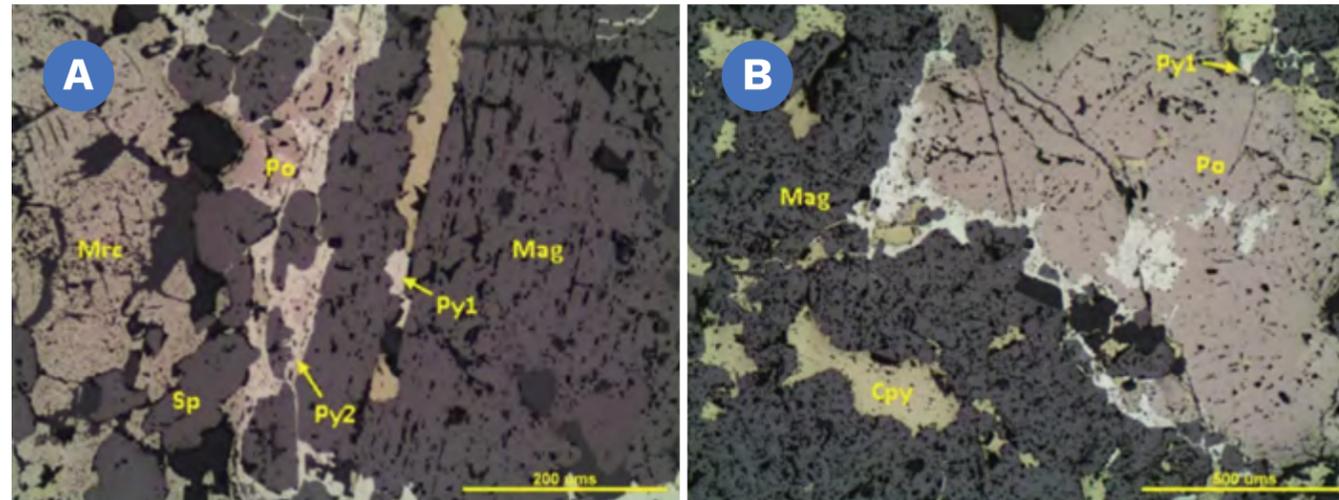
Se explotan afloramientos locales en superficie de magnetita y pirrotina masivas en una roca caja fresca, de color gris verdoso, de composición gabroide, con calcopirita y pirita diseminadas eventualmente con textura porfirítica y vetilleo de cuarzo. Presenta alteración propilítica débil con epidota, más o menos clorita y carbonatización de feldspatos (Fotografía 4.9).

Magnetita; presenta intercrecimiento con pirrotina y calcopirita; se observa recristalización de pirita en bordes de grano y marcasita con textura reléctica de pirrotina (Fotografía 4.10).

Fotografía 4.9. Calcopirita y pirita diseminadas en roca ígnea. Fuente: Autores.



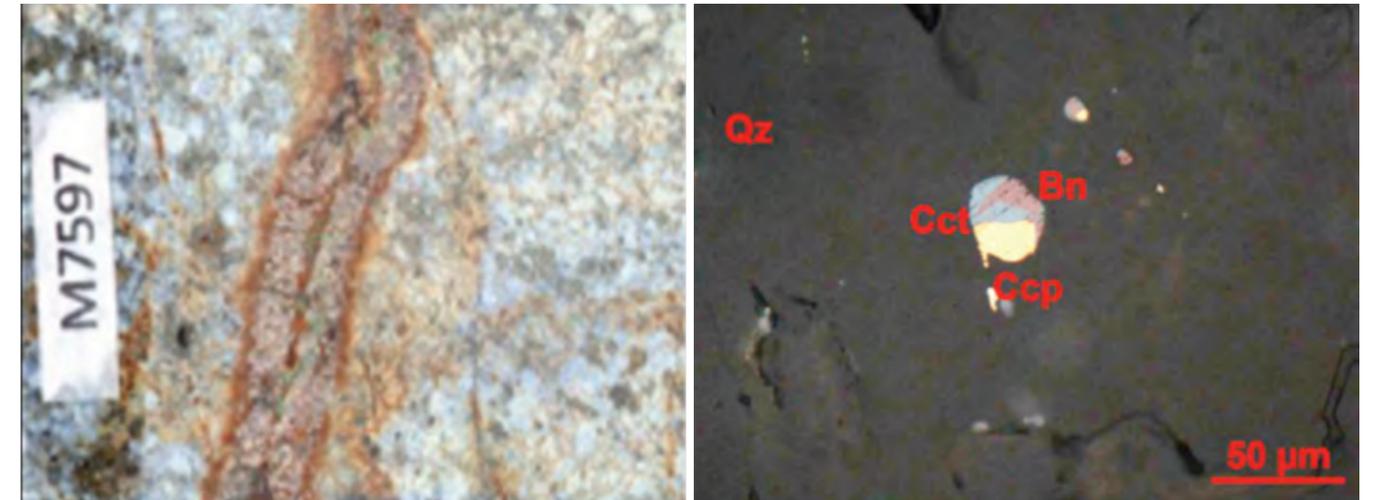
Fotografía 4.10. A) Cristales subhedrales de Magnetita, relacionada con Po, Cpy y Py1. Pirrotina reemplazada por Py2 y marcasita. B) Magnetita masiva asociada a Po, Cpy y Py2. Mina Buenos Aires. Aumento: 4X. Fuente: Autores.



## Mina Teherán

En la mina Teherán se explotan delgadas vetas de sulfuros masivos compuestas de pirita (Py), calcopirita (Cpy) y esfalerita (Sph). En la superficie están casi totalmente oxidados a hematita y calcosina. La roca hospedante es una roca ígnea fanerítica de grano fino con diseminación de calcopirita y pirrotina (Fotografía 4.11).

Fotografía 4.11. Roca mineralizada con venillas de óxidos de hierro y cobre. Diseminación de calcopirita y bornita parcialmente oxidadas a calcosina. Fuente: Autores.

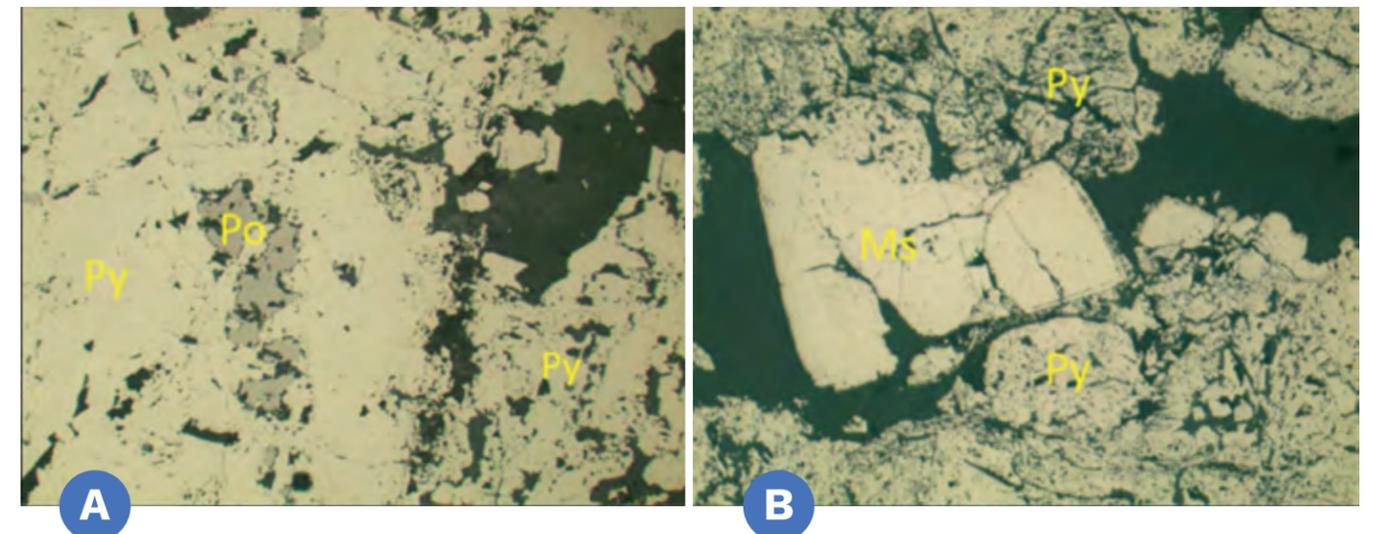


## Mina Pirita

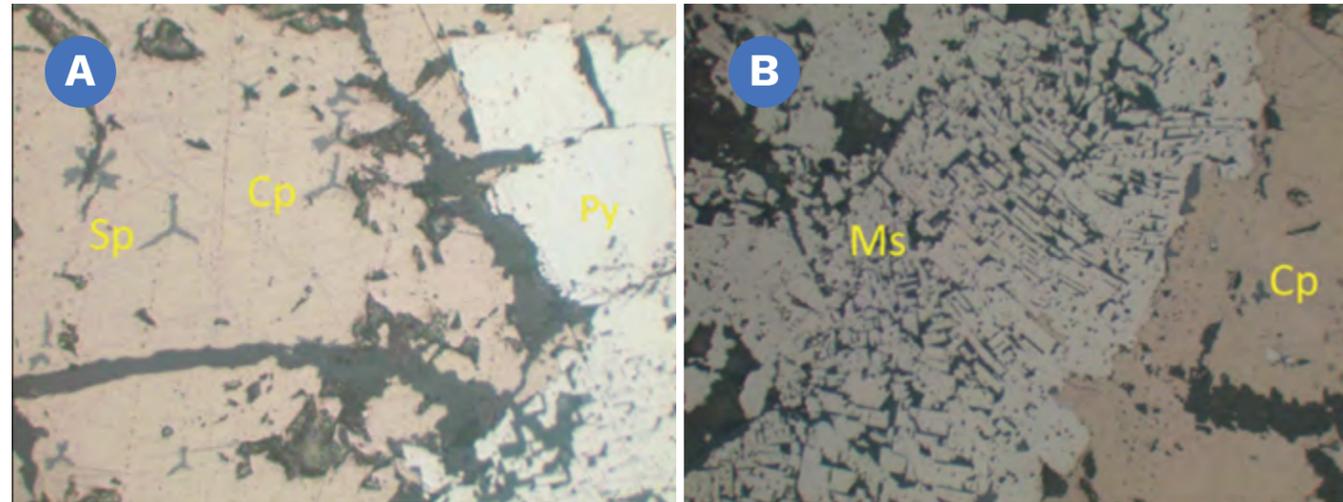
La mineralización es de tipo vetiforme y exhibe calcopirita y pirita masivas; microscópicamente se observan agregados masivos de calcopirita y pirita dominantes, con esfalerita secundaria, que se desarrollan como agregados masivos de pirita y marcasita formadas a partir de la pirrotina y exhiben textura reléctica, esquelética, framboidal y de sobrecrecimiento. La pirrotina se observa como núcleos en pirita con textura reléctica. La esfalerita se presenta en agregados masivos y exsuelta de calcopirita en forma de estrellas. En menor proporción se hallaron magnetita y hematita menores de 2% con textura reléctica previa a la mineralización de sulfuros. Los telururos-Ag están presentes en proporciones menores de 1% (Fotografía 4.12 y Fotografía 4.13).

La presencia de telururos de plata en algunas menas indica un proceso hidrotermal posterior, lo cual permite plantear la superposición de procesos mineralizantes en la zona (Fotografía 4.14).

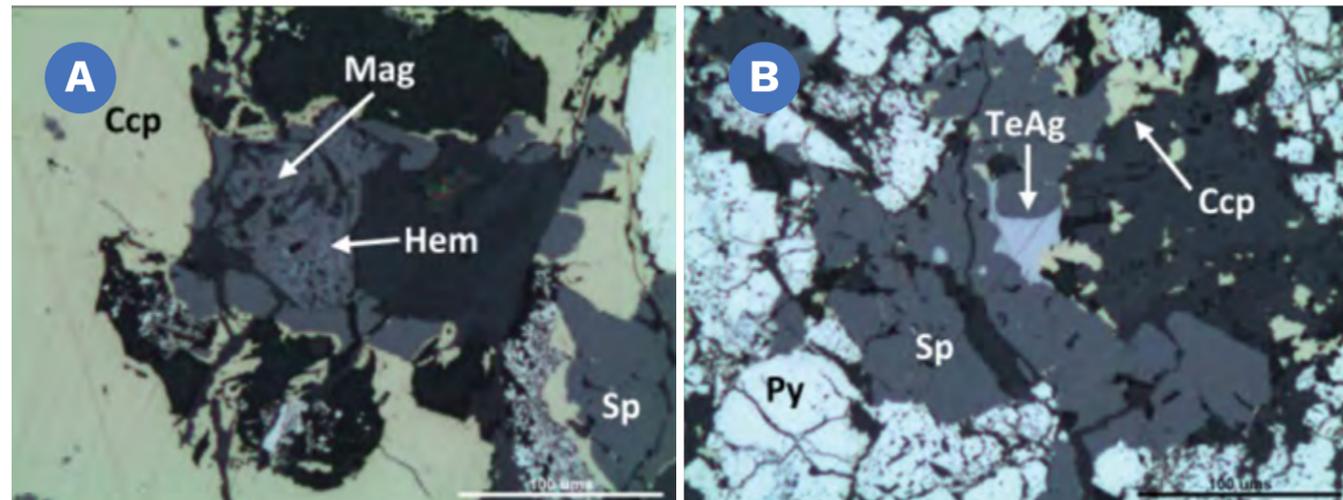
Fotografía 4.12. Mena aurífera en la mina Pirita. A) Núcleos de pirrotina (Po) en pirita (Py). B) Neoformación de marcasita (Ms) y pirita framboides. Aumento: 20X. Fuente: Autores.



Fotografía 4.13. Mena aurífera en la mina Pirita. A) Calcopirita con esfalerita en estrellas (Cp-Sp). B) Neoformación de marcasita (Ms) asociada a calcopirita. Aumento: 50X. Fuente: Autores.



Fotografía 4.14. A) Magnetita-hematita asociada a calcopirita. B) Telururos de plata en relleno de cavidades. Fuente: Autores.



## Mina Raa

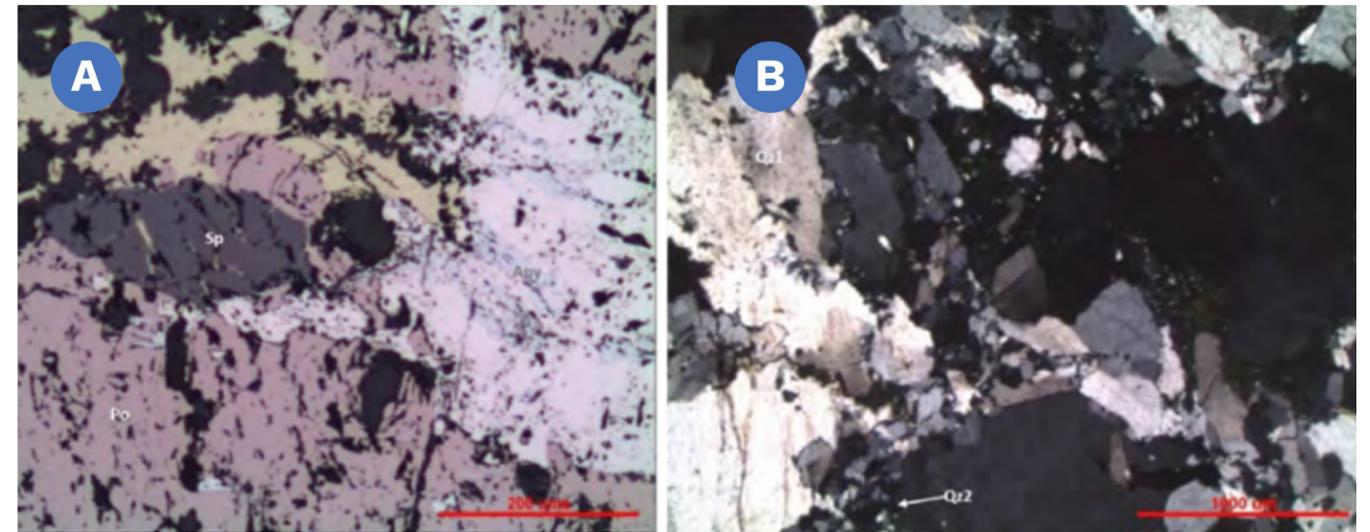
El filón observado en la mina Ra es masivo. La composición mineralógica aproximada de la mena consiste en pirrotina, cerca del 60%; pirita, 9%; arsenopirita, 7%; calcopirita, 5%; esfalerita, <1%, hematita, 1%, y cuarzo, menos del 16% (fotografía 4.15). El oro se observó incluido en pirrotina, con tamaños de 15 a 160  $\mu\text{m}$ .

Las alteraciones de los respaldos son principalmente sílice y clorita (Fotografía 4.15).

### 4.2.4.2. MICROTERMOMETRÍA Y ANÁLISIS DE INCLUSIONES FLUIDAS

Los análisis microtermométricos correspondientes a la mina Buenos Aires practicados en cristales de apatito indican la presencia de inclusiones fluidas primarias, pseudosecundarias y secundarias, que registran la evolución físico-química del fluido hidrotermal involucrado en los eventos de mineralización. Es así como las inclusiones fluidas primarias registran salinidades muy altas, que oscilan entre 29,6 y 29,9 wt% NaCl eq., con temperaturas de homogeneización de entre 270,2 y 330  $^{\circ}\text{C}$ . Por su parte, las inclusiones fluidas secundarias, con temperaturas de homogeneización en rangos menores, entre 259,4 y 284,4  $^{\circ}\text{C}$ , y salinidades bajas de entre 3,42 a 3,91% wt% NaCl eq., y con los análisis de espectroscopia Raman que indican que en las inclusiones no existen gases asociados, pueden significar la presencia de depósitos de Fe-Cu-Au del tipo IOCG.

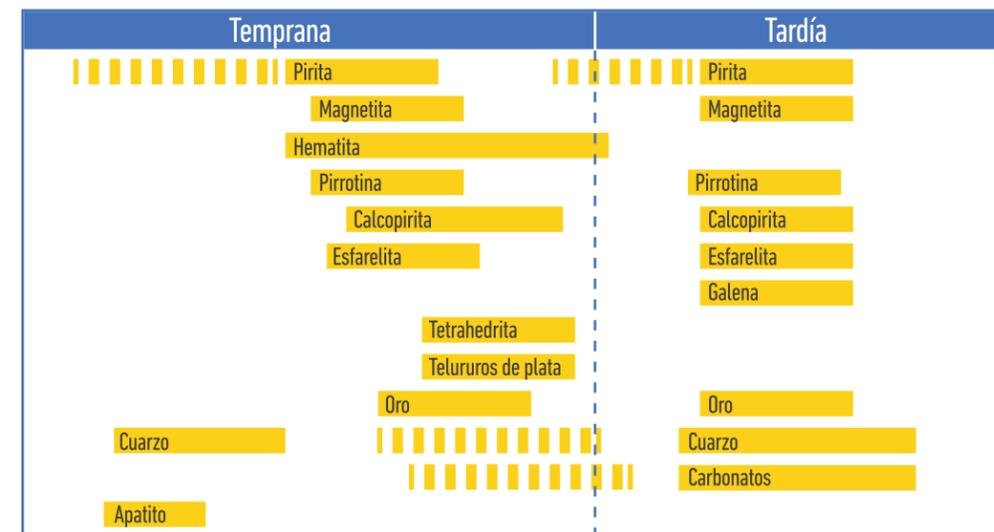
Fotografía 4.15. Mena y ganga: A) sulfuros en los que domina pirrotina. B) Ganga de cuarzo con dos poblaciones. Mina Raa. Fuente: Autores.



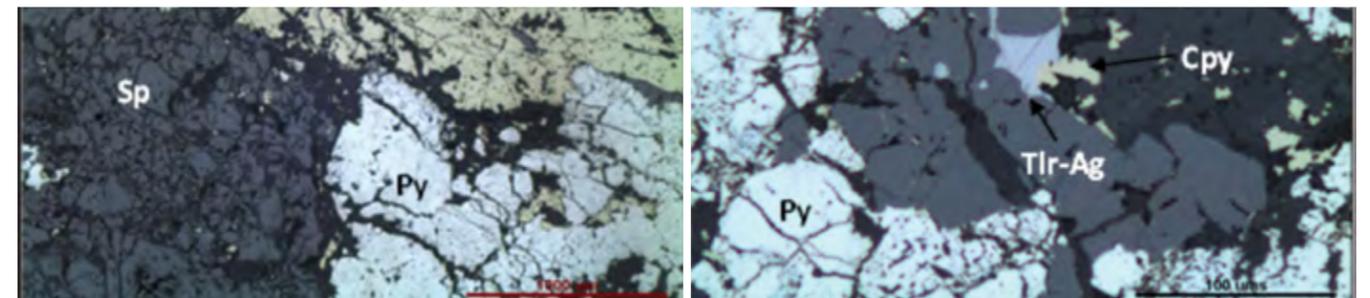
### 4.2.4.3. SECUENCIA PARAGENÉTICA

La secuencia paragenética establecida para la zona está precedida por alteración sódico-cálcica y al menos dos eventos masivos de mineralización consecuentes. En la etapa principal la mineralización es masiva de magnetita-pirrotina-calcopirita, con enriquecimiento de oro, y luego una fase tardía de cristalización de pirrotina-calcopirita y magnetita (Fotografía 4.16).

Figura 4.8. Secuencia paragenética generalizada del área. Fuente: autores.



Fotografía 4.16. Asociación pirita-calcopirita-esfalerita. Fuente: Autores.



## 4.2.5. OCURRENCIA DE ORO EN VETA

Un total de 13 granos de oro fueron hallados en las secciones petrográficas analizadas. El oro en Puerto Libertador se presenta generalmente incluido y asociado en Pirrotita, de tamaño menor de 40 micrómetros; solo se hallaron dos granos mayores de 90 micrómetros asociados tanto a telururos como a esfalerita, mientras que solo una partícula se encuentra libre en cuarzo. Únicamente fue posible hallar oro en las muestras de las minas Pirita y Raa; se halló solo un grano en mina Teherán, mientras que no fue posible hallar oro en las muestras de mena de El Alacrán.

Cabe mencionar que con la cantidad de granos de oro hallados no es posible hacer generalizaciones, así que los resultados se consideran como una tendencia indicativa.

Figura 4.9. Asociación de partículas de oro en minas de Puerto Libertador. Fuente: autores.

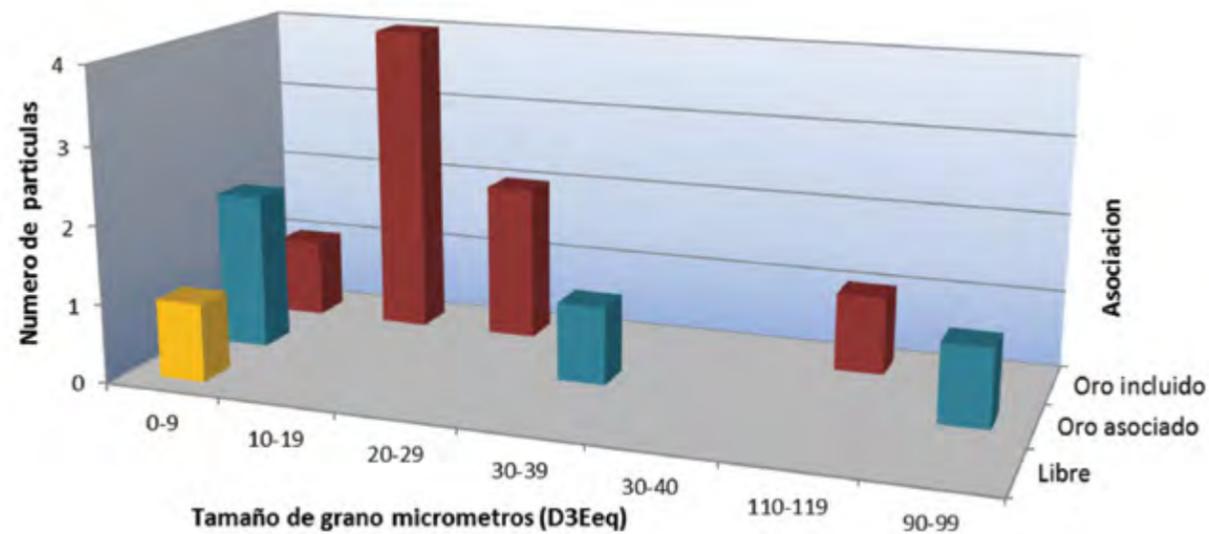
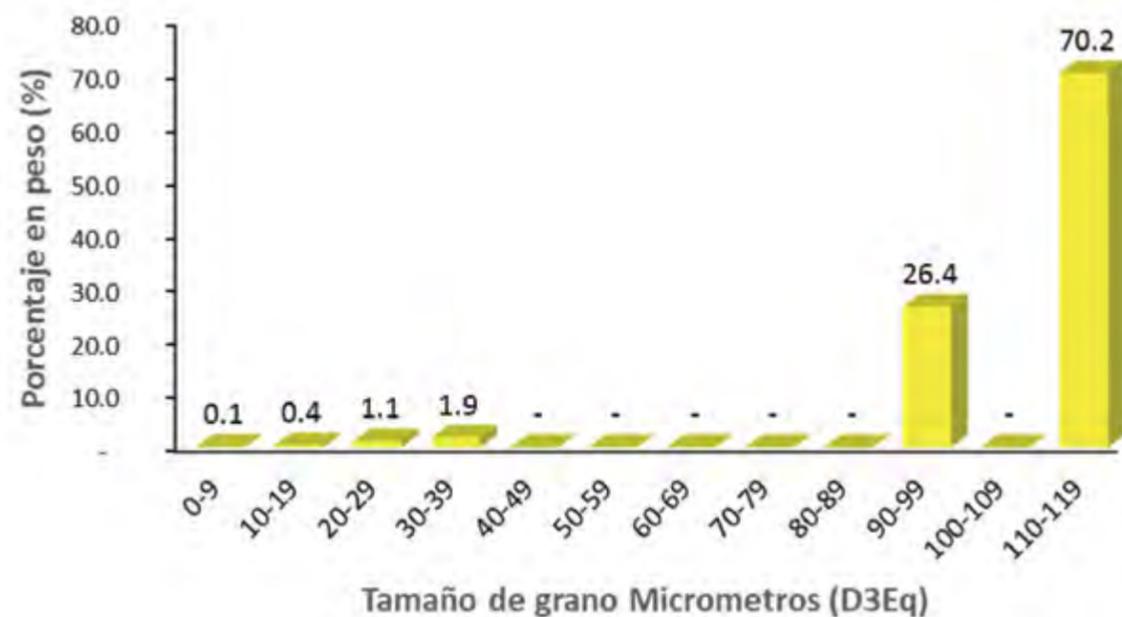


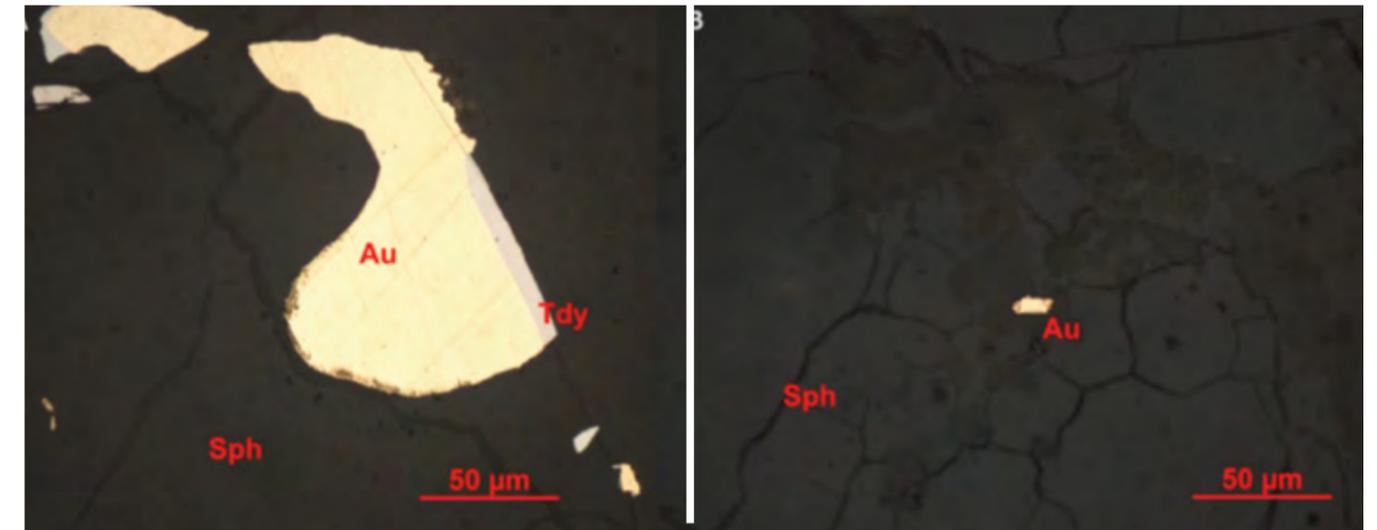
Figura 4.10. Distribución de partículas de oro en porcentaje en peso. Puerto Libertador. Fuente: autores.



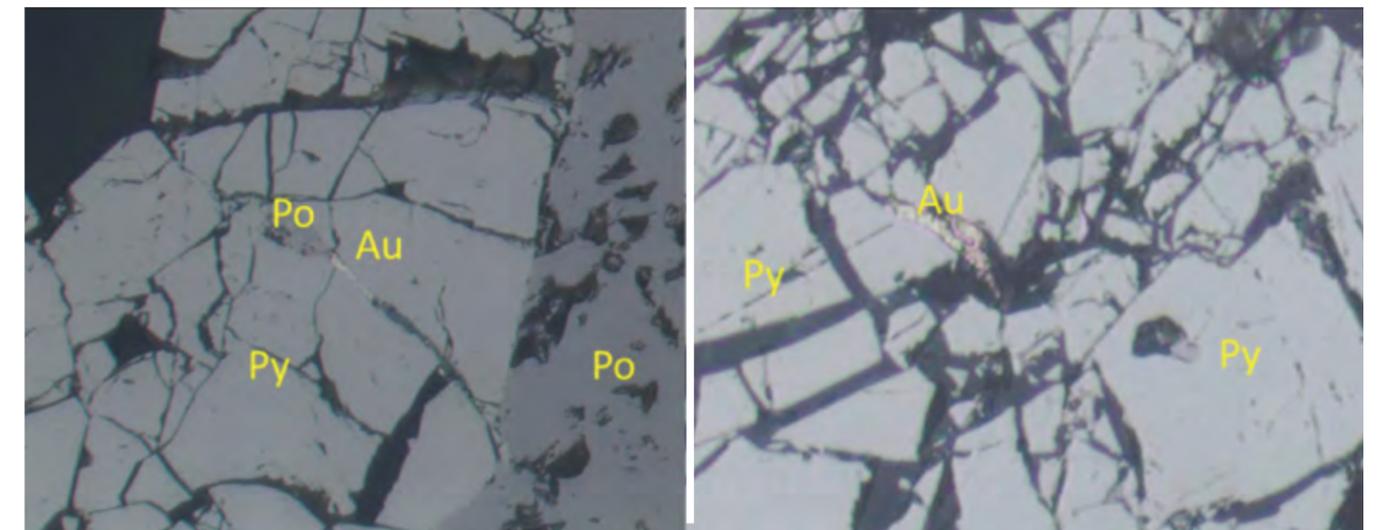
### 4.2.5.1. DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE ORO

Considerando el diámetro equivalente (D3Eq) como el tamaño de grano unidimensional, el tamaño de las partículas de oro halladas en las muestras colectadas corresponde con una población menor de 40 micrómetros, predominantemente incluidas en pirrotina, mientras que las partículas de oro mayores de 90 micrómetros halladas corresponden a oro incluido en pirrotina y oro asociado a telururo. Esta última fracción representa casi el 97% del oro hallado (figura 4.10).

Fotografía 4.17. Oro asociado a telururos, incluidos en esfalerita de la mina Pirita. Fuente: Autores.



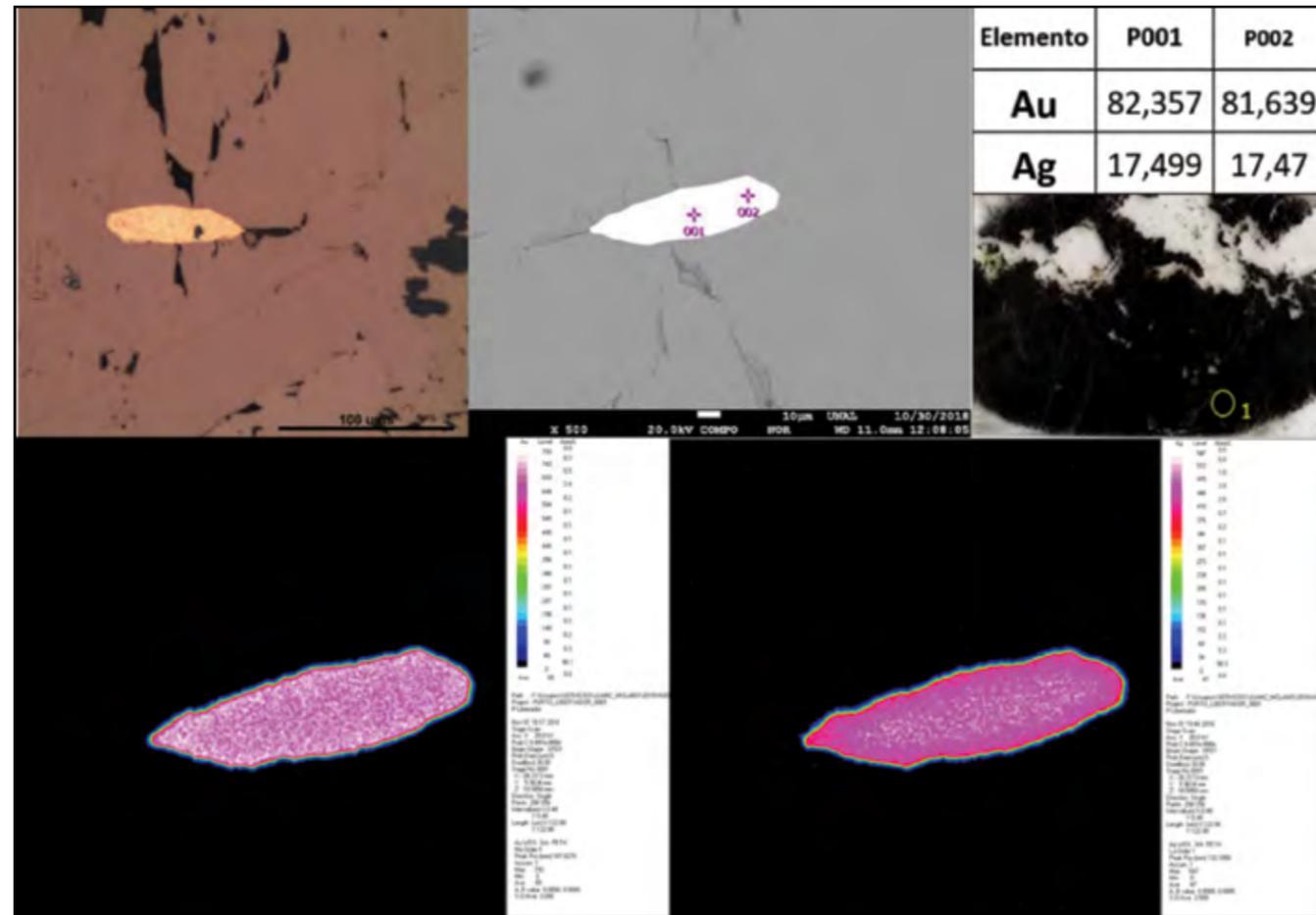
Fotografía 4.18. Oro asociado a pirrotina en relleno de fractura incluido ; en pirita. Aumento: 20X. Fuente: Autores.



### 4.2.5.2. CALIDAD DEL ORO

Los análisis de calidad del oro (EPMA) realizados por microscopia electrónica indican valores de Au por encima del 80%, lo cual permite clasificarlos como oro nativo; pequeñas cantidades de mercurio y telurio distribuidas uniformemente en las partículas fueron detectadas en el oro de la mina Raa.

Fotografía 4.19. Caracterización de los granos de oro en la mina Raa. Fuente: Autores.



#### 4.2.6. MODELO METALOGÉNICO

La mayoría de las mineralizaciones visitadas y observadas corresponden a mineralizaciones vetiformes con tendencia NW y NNE que exhiben rocas máficas (mina Pirita) y porfíricas con texturas de stockwork de cuarzo, con alteraciones potásicas de biotita y feldespato; también se observan mineralizaciones en rocas estratificadas a manera de mantos de reemplazamiento de sulfuros masivos que se presentan en secuencias vulcano-sedimentarias con enriquecimientos supergénicos en la parte superior (mina El Alacrán).

La composición mineralógica de las menas de la totalidad de las minas visitadas consiste en proporciones variables de sulfuros como pirrotina, calcopirita, pirita esfalerita con altos contenidos de magnetita y/o hematita.

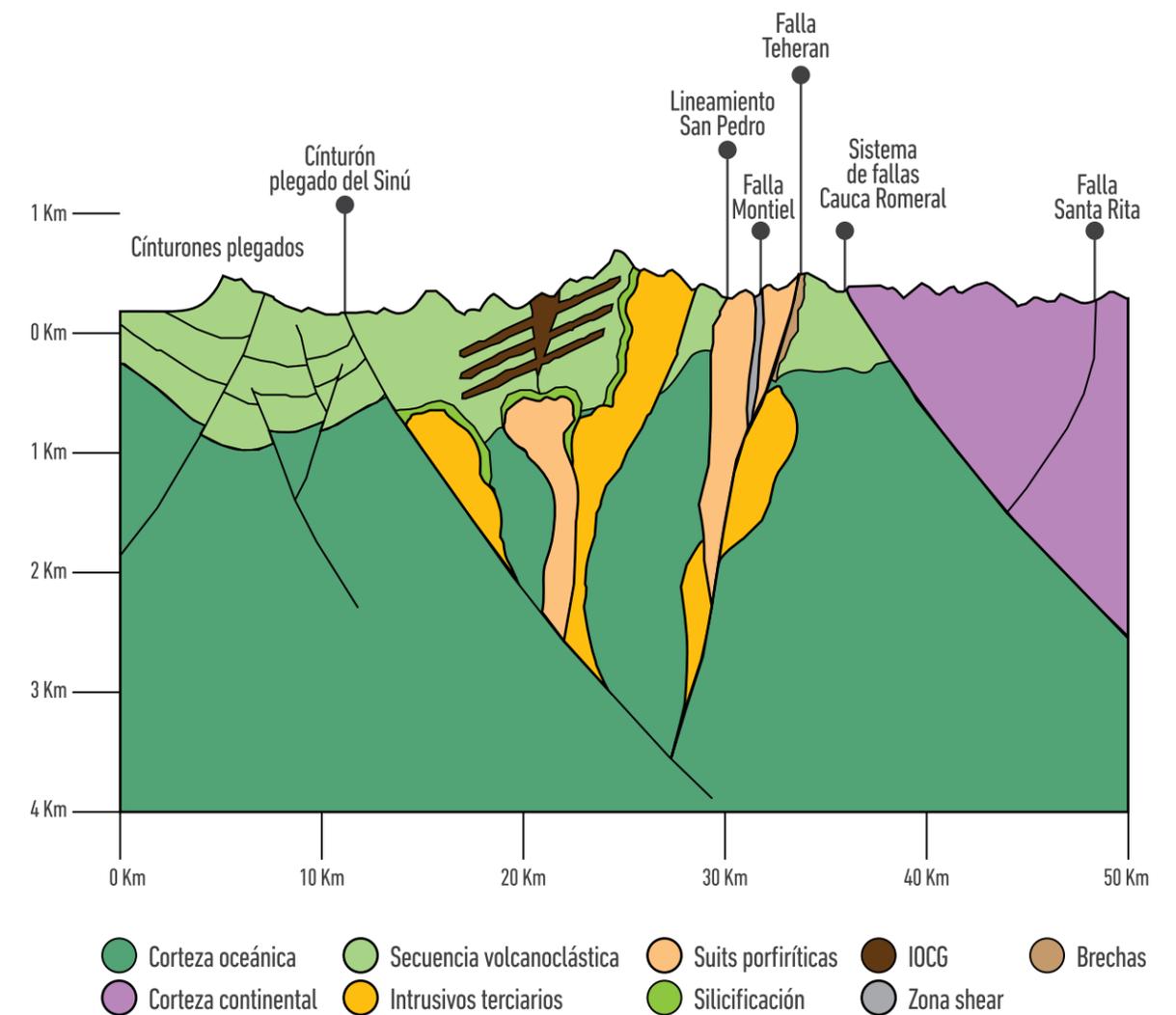
Los fluidos mineralizantes característicos en una muestra de la mina Buenos Aires indican temperaturas superiores a 300 °C y altas salinidades, cercanas al 30%, así como temperaturas más bajas (260 °C) con salinidades de 3% de NaCl Eq en inclusiones secundarias.

Para el área de estudio, y teniendo en cuenta los estilos de mineralización, alteraciones hidrotermales, microtermometría y mineralización aurífera, se considera que la mineralización primaria es similar a la descrita de los depósitos de Fe-Cu-Au del tipo IOCG.

#### 4.2.7. UNIDADES GEOMETALÚRGICAS (UGMS).

Se han diferenciado tres tipos de asociaciones mineralógicas principales: la primera consiste en magnetita-pirrotina-calcopirita (minas El Alacrán y Buenos Aires); la segunda es una asociación de pirita-calcopi-

Figura 4.11. Modelo metalogénico, Puerto Libertador. Fuente: autores.



rita-pirrotina (mina Pirita) con magnetita en bajas proporciones, y la tercera es una asociación de pirrotina-calcopirita-pirita, con magnetita en bajas proporciones (minas Raa y Teherán). Las tres menas ofrecen dificultades para la cianuración y se consideran altamente refractarias debido a la abundancia de pirrotina y la presencia de sulfuros secundarios de cobre derivados de la oxidación de calcopirita.

Por otro lado, el oro regularmente se encuentra incluido en pirrotina y asociado a telururos y pirita; su tamaño es menor de 80 micrómetros y puede representar una proporción considerable. Sin embargo, el oro de mayor tamaño que se puede encontrar removilizado, y eventualmente se libera en las primeras etapas de la molienda, representa la porción mayoritaria de este metal.

De acuerdo con lo expuesto, se plantea una única unidad geometalúrgica con características de alta refractariedad debida al tamaño fino del oro y una alta proporción de sulfuros cianicidas.

Los análisis petrográficos son útiles para la caracterización visual de los minerales sometidos a procesos de beneficio, en los que se consideran sus propiedades ópticas para determinar la composición mineralógica, el grado de liberación de sulfuros y la presencia de oro. Con el fin de determinar sus diferentes características mineralógicas, y para un diagnóstico más preciso del trabajo, en la planta de beneficio se analiza el material de la planta recolectado en el momento de la visita.

## 4.3. ANÁLISIS PETROGRÁFICOS DE MATERIAL DE PROCESO METALÚRGICO

Ciertos procedimientos metalúrgicos están fuertemente influidos por las condiciones de tamaño y forma de las partículas, y especialmente por la superficie libre de los minerales económicamente importantes. La posibilidad de cuantificar este componente es de gran utilidad en la estimación de la recuperación del mineral y en la optimización de los circuitos de molienda mediante la determinación del tamaño de partícula apropiado para liberar el oro.

Los análisis petrográficos o metalográficos permiten determinar algunos parámetros de ensayos geometalúrgicos más influyentes para identificar el grado de liberación de los minerales sulfurados asociados con la mineralización de oro, así como las asociaciones mineralógicas y el tamaño de los granos de oro encontrados en los materiales de plantas de beneficio instaladas.

Se toman como referencia las plantas de las minas Pirita, Raa y El Alacrán (planta de Manuel Díaz), por considerar que, desde el punto de vista mineralógico, son representativas de cada zona minera.

### 4.3.1. COMPOSICIÓN

Figura 4.12. Composición de minerales metalicos. Mina Pirita. Fuente: autores.

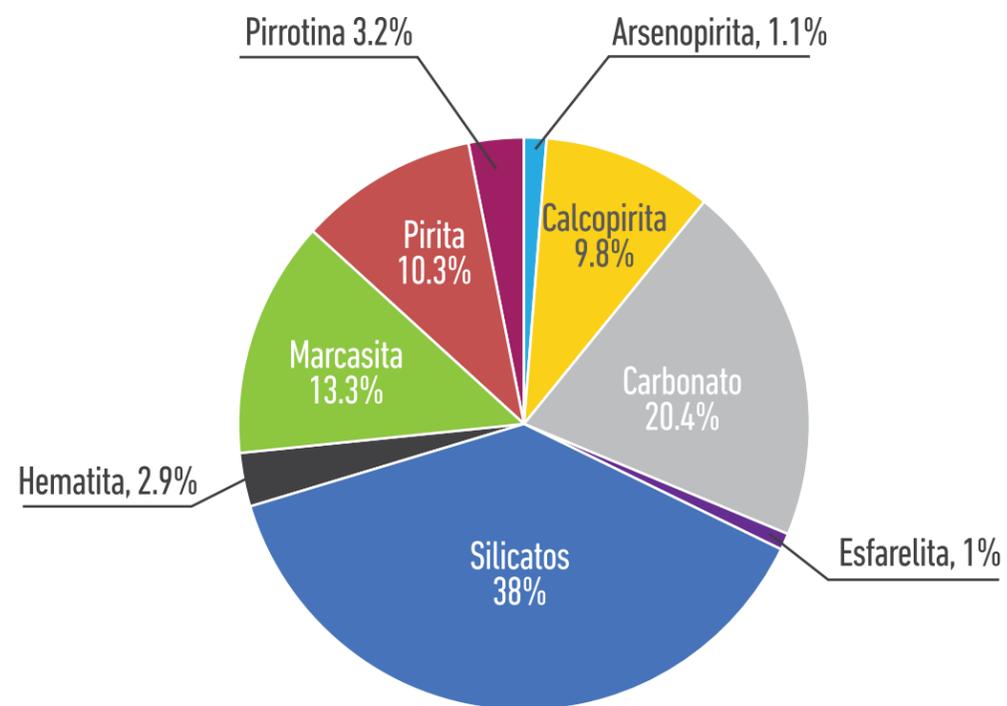


Figura 4.13. Composición de minerales metalicos. Mina El Alacrán. Fuente: autores.

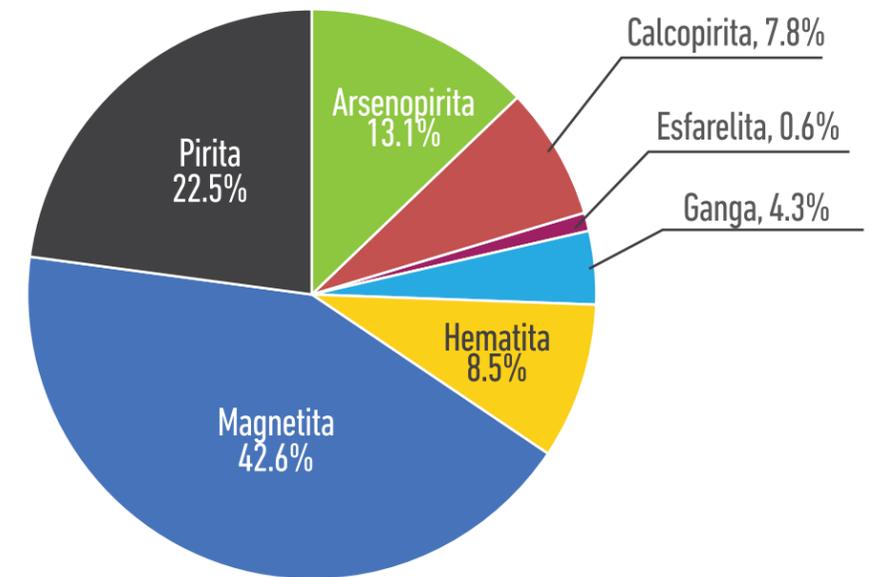
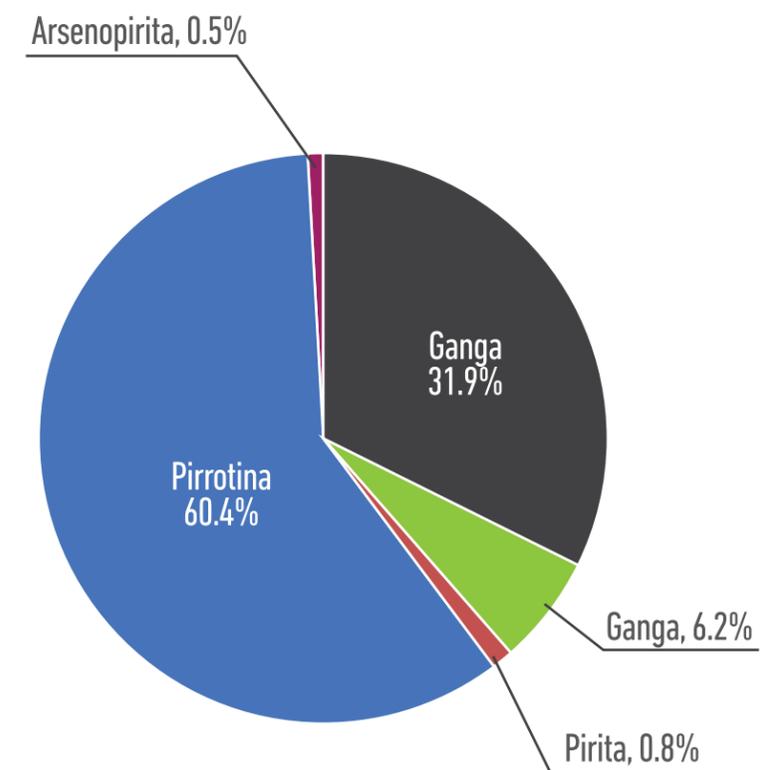


Figura 4.14. Composición de minerales metalicos. Mina Raa. Fuente: autores.



## 4.3.2. ASOCIACIÓN DE MINERALES METÁLICOS

Figura 4.15. Asociación de los minerales metálicos. Mina Pirita. Fuente: autores.

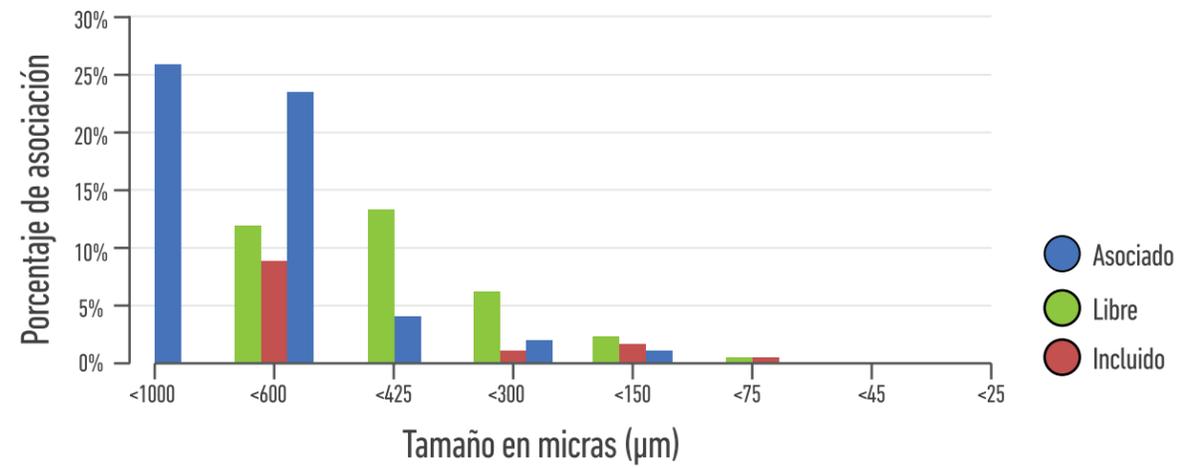


Figura 4.16. Asociación de los minerales metálicos. Mina El Alacrán. Fuente: autores.

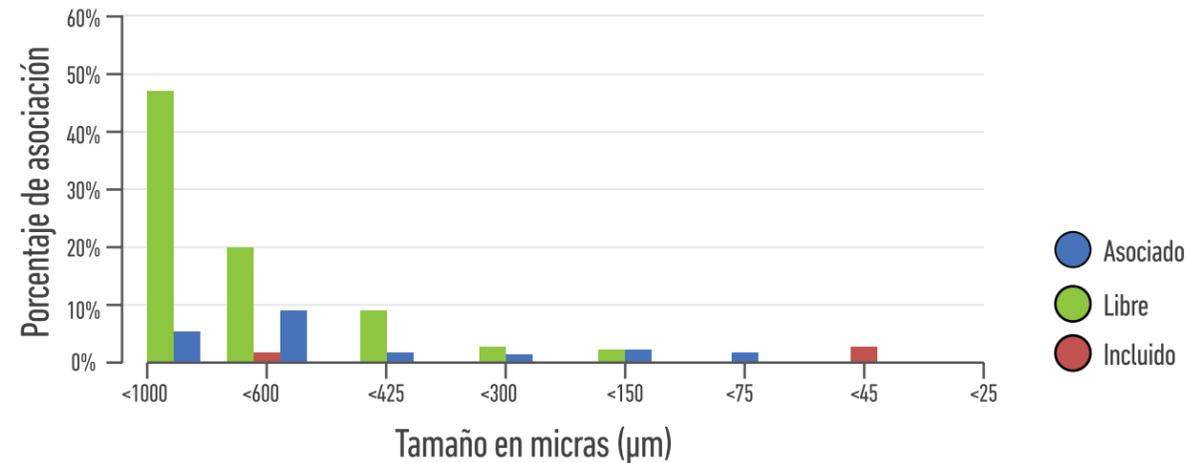


Figura 4.17. Asociación de los minerales metálicos. Mina Raa. Fuente: autores.

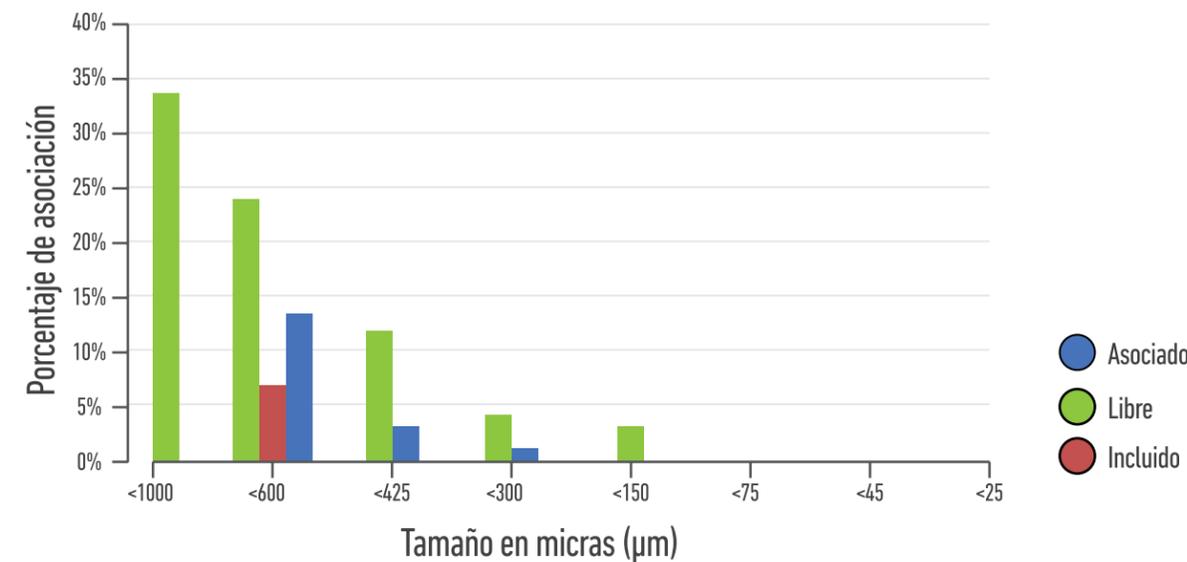


Figura 4.18. Asociación de minerales metálicos vs rango tamaño. Mina Pirita. Fuente: autores.

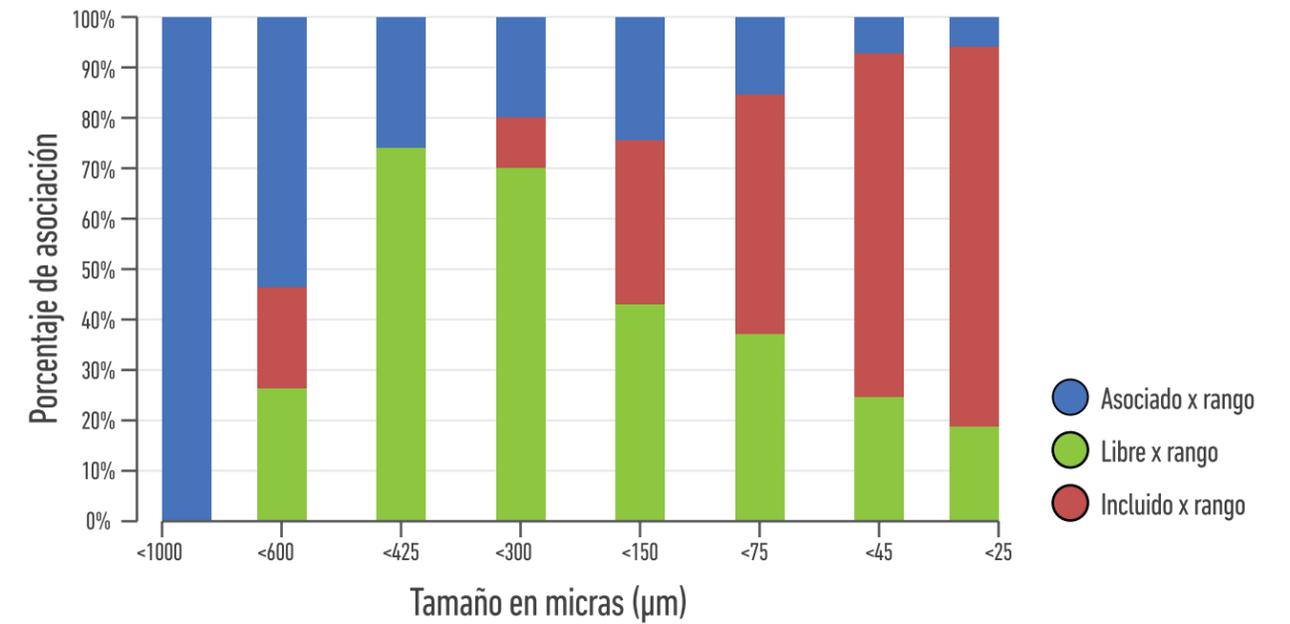


Figura 4.19. Asociación de minerales metálicos vs rango tamaño. Mina El Alacrán. Fuente: autores.

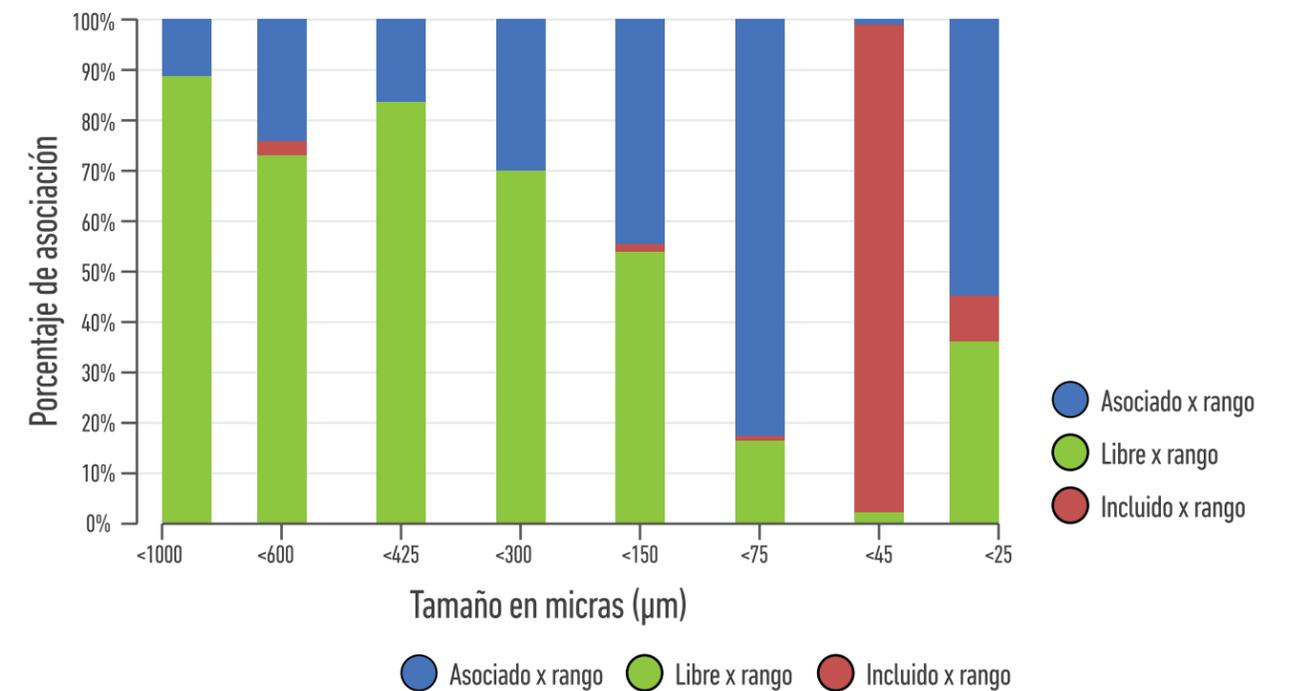


Figura 4.20. Asociación de minerales metálicos vs rango tamaño. Mina Raa. Fuente: autores.

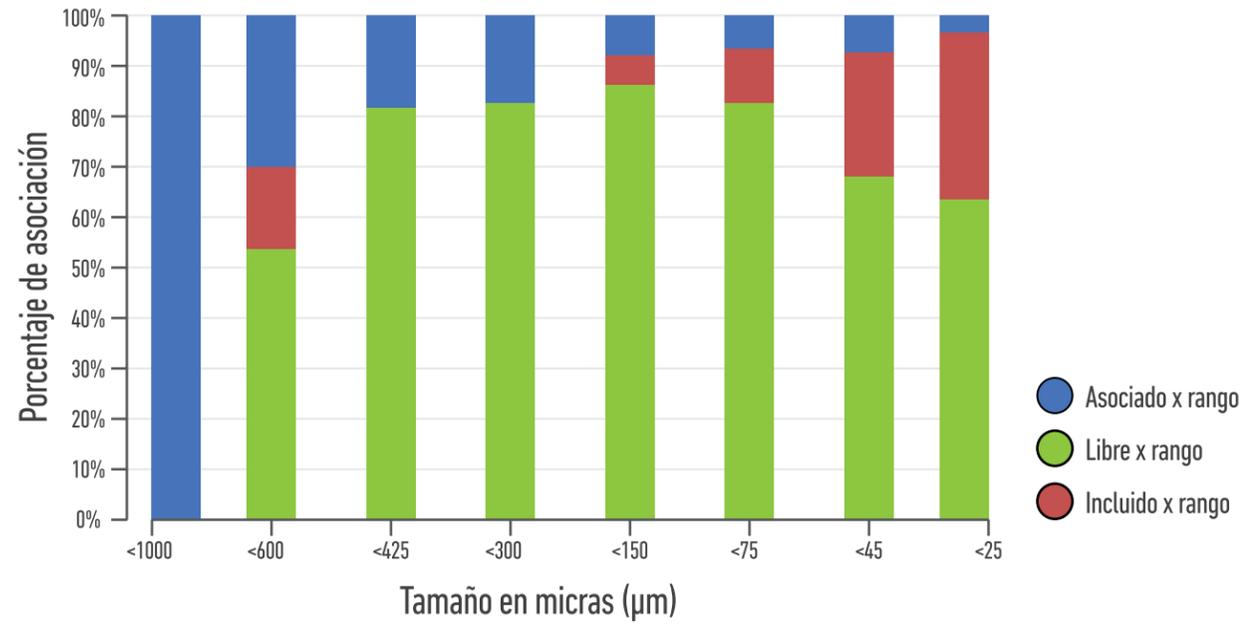
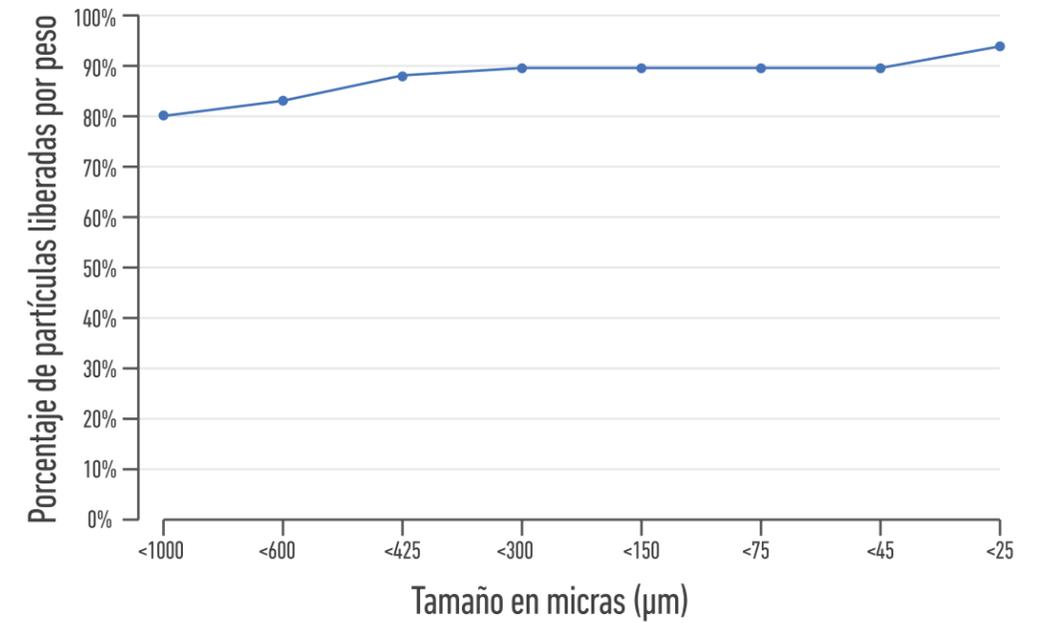
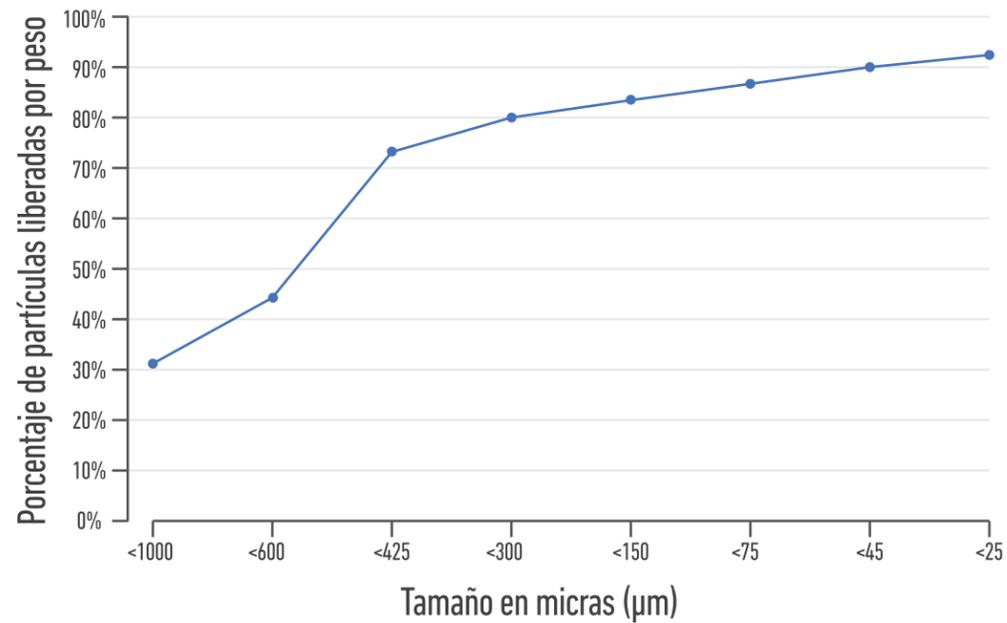


Figura 4.22. Porcentaje de liberación de minerales metálicos, según tamaño de molienda. Mina El Alacrán. Fuente: autores.



### 4.3.3. LIBERACIÓN DE MINERALES METÁLICOS

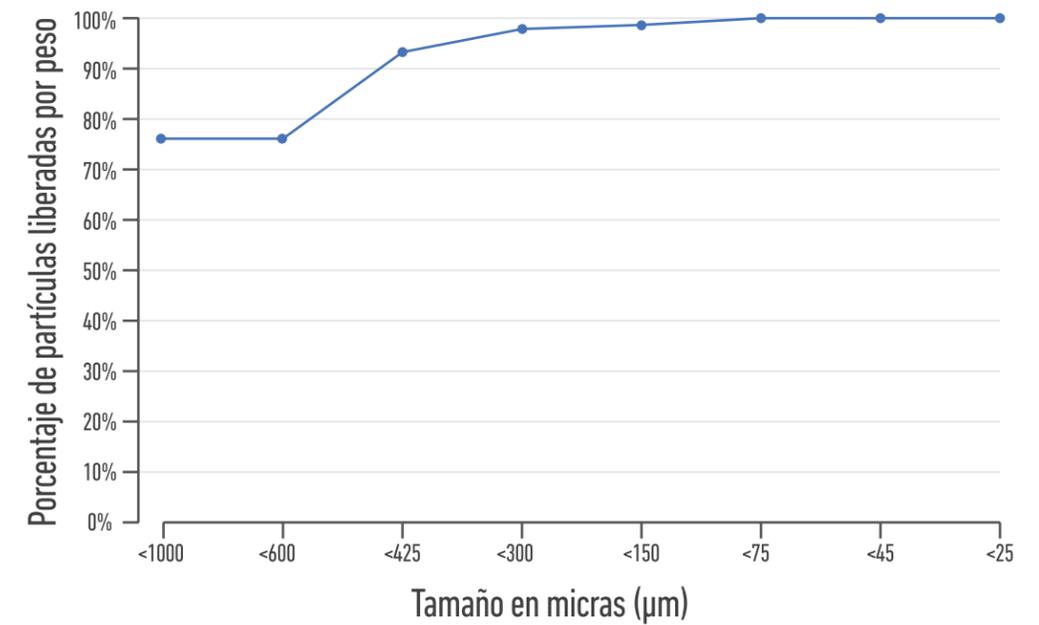
Figura 4.21. Porcentaje de liberación de minerales metálicos, según tamaño de molienda. Mina Pirita. Fuente: autores.



En la mina Pirita, con una molienda a 300 micrones se tendría una liberación del 80% de los minerales metálicos; a 75 micrones sería del 88%.

La medida realizada en el sector de El Alacrán reporta que con una molienda a 425 micrones se tendría una liberación de un 90% de los minerales metálicos.

Figura 4.23. Porcentaje de liberación de minerales metálicos, según tamaño de molienda. Mina Raa. Fuente: autores.



En el sector de la mina Raa, con una molienda a 425 micrones se tendría una liberación del 90% de los minerales metálicos. A 150 micrones la liberación sería del 99%.

## 4.3.4. LIBERACIÓN DE ORO

### Liberación de oro mina Pirita

Figura 4.24. Proporción del tipo de asociación del oro. mina Pirita. Fuente: autores.

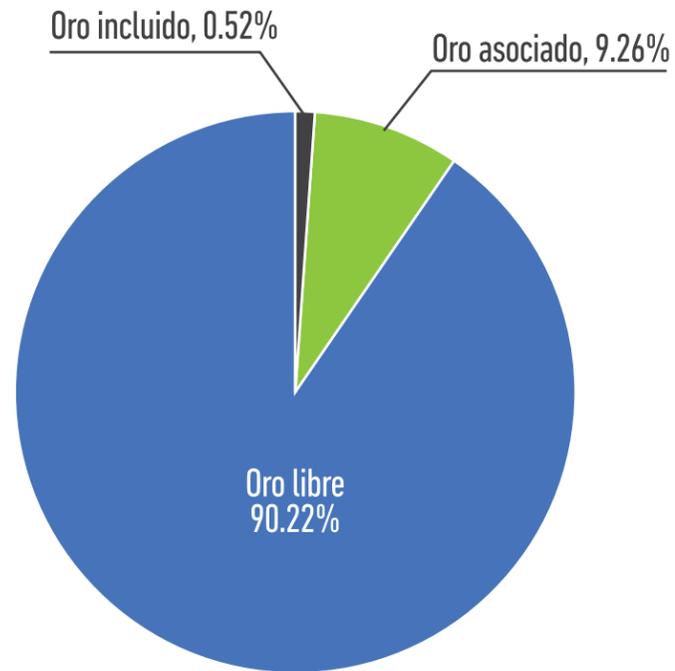
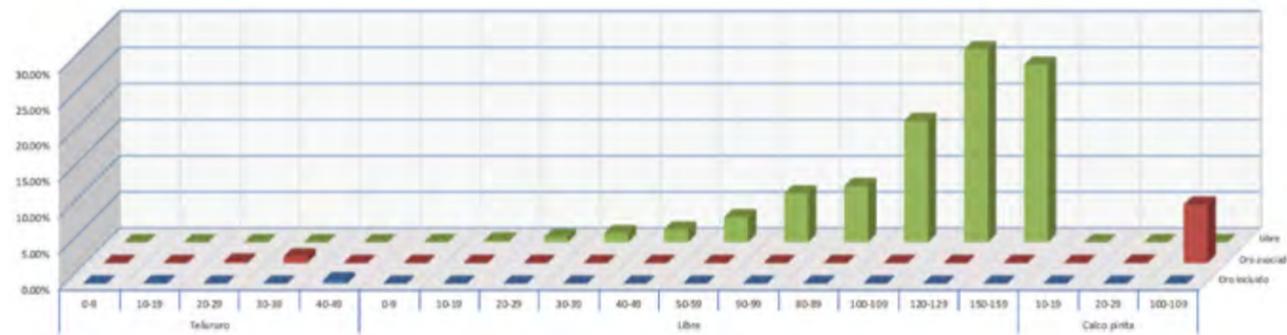


Figura 4.25. Asociación del oro por mineral y por tamaño. Mina Pirita. Fuente: autores.



Las partículas de oro se aprecian sin asociación. Moliendo a 100 micrones se dispondría del 52% del oro. A 50 micrones, el 70%; y a 10 micrones, el 95%.

### Liberación de oro mina El Alacrán

Hace falta la evidencia del oro asociado a la magnetita. El material magnético aparece en una proporción del 70 %. Una extracción del material magnético en el laboratorio probó que el 44 % del oro se asocia al material magnético.

En Alacrán con una molienda de 75 micrones se tendría expuesto el 35% en peso del oro. A 35 micrones, el 92%.

Figura 4.26. Proporción del tipo de asociación del oro. Alacrán. Fuente: autores.

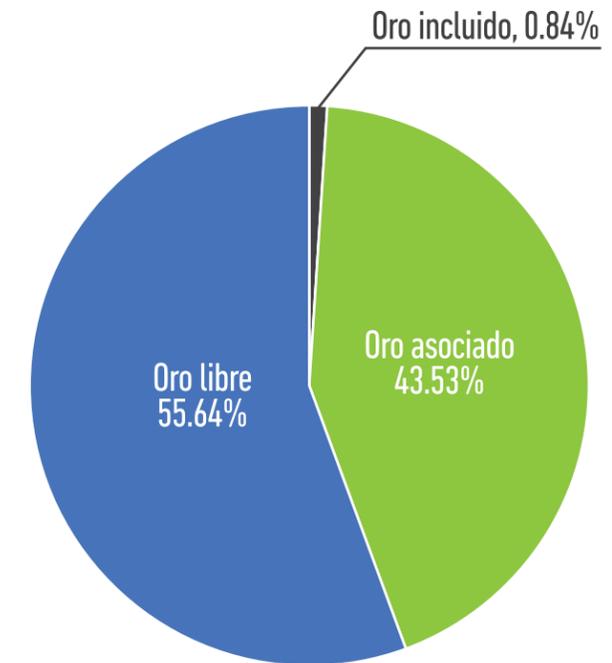
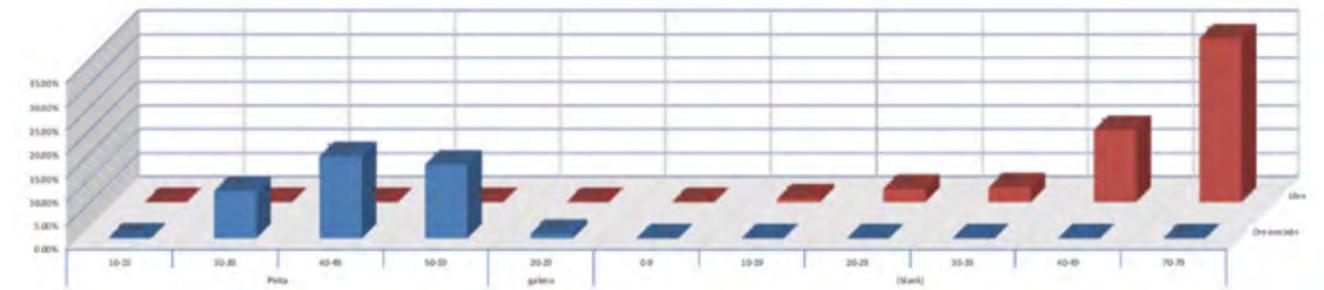


Figura 4.27. Asociación del oro por mineral y por tamaño. Mina El Alacrán. Fuente: autores.



### Liberación de oro mina Raa

Figura 4.28. Proporción del tipo de asociación del oro. Mina Raa. Fuente: autores.

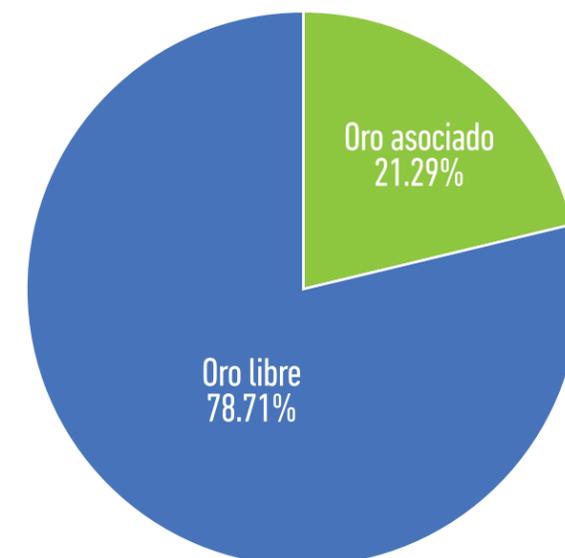
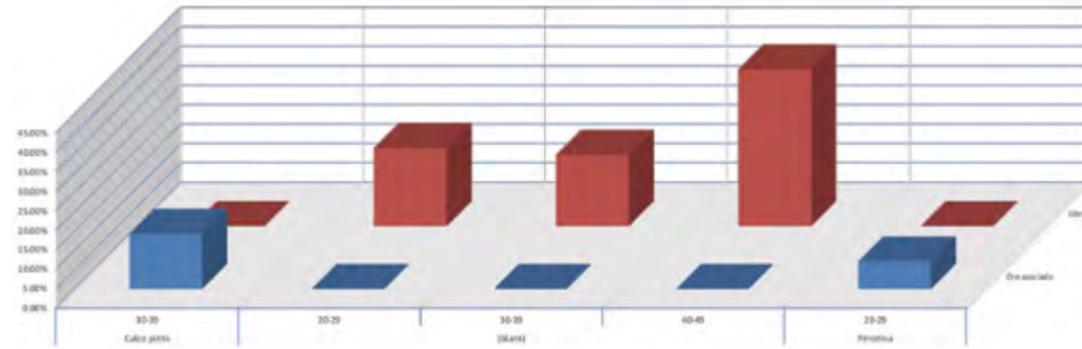


Figura 4.29. Asociación del oro por mineral y por tamaño. Mina Raa. Fuente: autores.



## 4.4. CONSIDERACIONES EN GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA PARA EL BENEFICIO

- La mineralización aurífera del área de Puerto Libertador coincide con las características de los depósitos enriquecidos en metales del tipo Fe-Cu-Au, donde predomina la presencia de óxidos de Hierro como magnetita-hematita y sulfuros metálicos como pirrotina-pirita-calcopirita.
- Para el área en general, la mineralización aurífera obedece a la formación de menas de óxidos de hierro y sus intercambios minerales por reacciones de óxido-reducción, como la recrystalización de pirrotina-pirita a partir de magnetita (martitización), o fenómenos de formación de magnetita a partir de hematita (mushketovitización).
- La característica principal de la mena del distrito minero es el predominio de minerales metálicos Pirita, pirrotina y magnetita mayores a 75 % sobre la ganga de cuarzo y carbonato. La presencia de altos contenidos de calcopirita en proporciones variables entre el 5% y 25 % también es una característica relevante del depósito.
- Los altos contenidos de calcopirita en las minas El Alacrán y Pirita (> 20%) y marcasita (11%) en la mina Pirita son indicadores de alta refractariedad en los procesos de beneficio, especialmente en las etapas de cianuración y flotación.
- La ocurrencia de oro está relacionada principalmente con la precipitación de pirrotina y calcopirita en la principal fase de precipitación; sin embargo en fases finales de precipitación ocurre oro asociado con esfalerita y telururos de plata.
- El tamaño de oro en términos generales es menor a 70 micrometros y resulta particularmente interesante la presencia de oro mayor a 100 micrometros en las zonas superficiales donde por meteorización física y química (alteración supergénica) se concentra oro de gran tamaño y puede explotarse superficialmente mediante el lavado de suelos.
- Se plantea una única unidad geometalúrgica con características de alta refractariedad debidas a la presencia de sulfuros cianicidas en alta proporción y la existencia de oro de tamaño fino.
- La presencia de sulfuros en agregados policristalinos de tamaño centimétrico y cantidades menores de ganga propicia que la liberación tenga lugar en las etapas tempranas de trituración y que la presencia de sulfuros ligados alcance hasta el 20% de asociación. En las muestras de cabeza de las plantas analizadas la distribución granulométrica indica, por lo general, que por debajo de 300 micrometros el 98 % de minerales metálicos se halla liberado.

## 5. ASPECTOS MINEROS

En este capítulo se describen los aspectos mineros de las pequeñas explotaciones y minas artesanales (MAPE) que se visitaron en el municipio de Puerto Libertador. Para el desarrollo del proyecto inicialmente se realizó la socialización de las guías metodológicas con la Sociedad Córdoba Minerals Corp y con la comunidad minera de San Matías, minas Raa y El Alacrán.

---

Panorámica de mina Pirita en Puerto Libertador (Córdoba). Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano



# 5.1. FUNDAMENTOS TÉCNICO-MINEROS

## 5.1.1. ETAPAS DE UN PROYECTO MINERO

El proyecto minero se inicia con la etapa de búsqueda de recursos minerales de interés, que comprende la fase de prospección. Luego, en la exploración se realizan estudios más detallados de la geología del depósito mineral, y mediante estudios de prefactibilidad y factibilidad se define si se continúa con el proyecto minero, debido a que la continuidad del proyecto depende de diversos aspectos, como las características del depósito mineral, los recursos y reservas, el precio del mineral en el mercado internacional, la rentabilidad del proyecto, aspectos sociales y de comunidades, los trámites de legalidad minera y legalidad ambiental, áreas de restricción minera, etc., que son determinantes para la que se consolide el proyecto minero.

Los recursos minerales de un yacimiento pueden ser estimados sobre la base de la información geocientífica. Las reservas minerales son un subconjunto modificado de los recursos minerales indicados y medidos, y requieren la consideración de los factores modificadores que afectan la extracción. Estos incluyen factores de minería, procesamiento, metalúrgicos, infraestructura, económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales (CCRRM y ANM, 2018).

Una vez se establece que el proyecto minero continúa, se inicia la etapa de construcción y montaje, en la que, como su nombre lo dice, se instalan y realizan las obras y los accesos necesarios para ejecutar la etapa de explotación del mineral. En la etapa de explotación se realizan tres tipos de labores: desarrollo, preparación y operación.

Estas etapas constituyen el ideal para que un proyecto minero sea llevado a cabo, debido a que es fundamental determinar si se cuenta con recursos y reservas mineras en las fases de exploración, prefactibilidad y factibilidad, en las que se establece la viabilidad de continuar con el desarrollo del negocio minero.

La descripción detallada de las etapas de un proyecto minero se puede considerar de la siguiente manera:

**Prospección.** Consiste en localizar anomalías geológicas donde pueda existir un depósito mineral.

**Exploración.** Consiste en lograr un conocimiento detallado del depósito mineral descubierto en la etapa de prospección. Para ello se realiza un modelo geológico y de recursos del yacimiento y se adelanta el estudio de prefactibilidad para determinar si vale la pena continuar o no con el proyecto.

**Evaluación del proyecto.** Se basa en el estudio de factibilidad del proyecto, en la evaluación económica (costos, inversiones) y en el análisis de reservas. Además, se realizan los trámites legales, sociales, mineros y ambientales, así como el planeamiento minero.

**Construcción y desarrollo.** Comprende el conjunto de actividades que permiten el acceso al yacimiento y el establecimiento de la infraestructura para el proyecto. Incluye la adquisición de permisos para iniciar la explotación, el diseño y el planeamiento detallado de la explotación, además de trabajos previos que se realizan para llegar a la mina: vías de acceso, instalaciones, servicios sanitarios, instalaciones eléctricas y de agua, campamentos, montajes mineros y de beneficio.

**Desarrollo (minería subterránea).** El desarrollo es una etapa intermedia entre la exploración y la extracción propiamente dicha, y comprende las labores mineras encaminadas a crear los accesos y vías internas dentro del depósito, con el fin de preparar la extracción y el transporte del mineral. El desarrollo puede ser productivo o improductivo. Este último, en minería subterránea, ocurre cuando el avance se realiza en estéril (cruzadas). En cambio, es productivo cuando el avance horizontal se realiza con extracción de mineral (construcción de guías). (MME, 2015).

**Explotación.** 1) Proceso de extracción y procesamiento de los minerales, así como la actividad orientada a la preparación y desarrollo de las áreas que abarca el depósito mineral. 2) Es la aplicación de un conjunto de técnicas y normas geológico mineras y ambientales para extraer un mineral o depósito de carácter económico para su transformación y comercialización. Incluye la fase de producción” (MME, 2015).

**Preparación.** Labores mineras llevadas a cabo para facilitar la explotación apropiada del yacimiento o depósito, una vez se ha completado la exploración minera y se ha logrado el acceso y el desarrollo tanto en el rumbo como en el buzamiento. Las labores de preparación se realizan en su mayoría, dentro del yacimiento mismo e incluyen: 1) inclinados y tambores, 2) subniveles y sobreguías y 3) algunas cruzadas...” (MME, 2015).

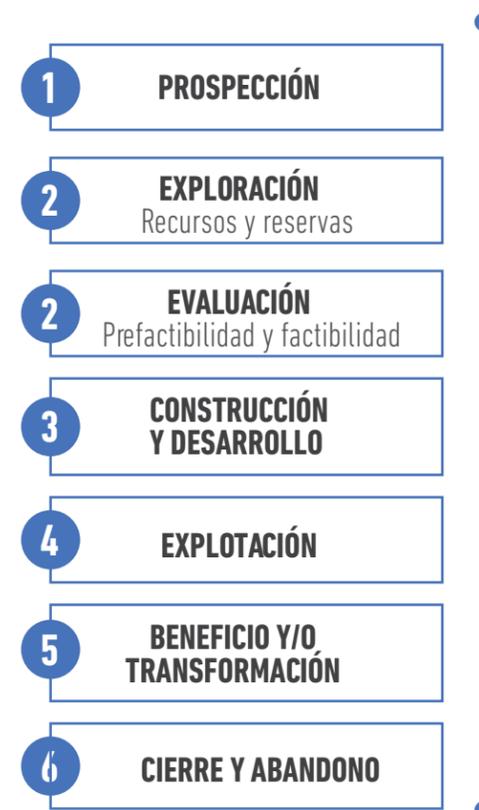
**Producción.** Durante la producción se extraen y procesan los materiales de interés económico, se readecuan los terrenos intervenidos y se conduce la mina. “Durante esta etapa se ejecuta una serie de actividades y ciclos que permiten que la mina permanezca en operación y producción. Estas son denominadas operaciones unitarias, y se clasifican entre las ejecutadas para desprender el mineral (arranque), para cargarlo (cargue) y para transportarlo hasta la planta o sitio de mercado (transporte). Estas operaciones se apoyan en las denominadas operaciones auxiliares” (MME, 2015).

**Beneficio.** “Conjunto de operaciones empujadas en el tratamiento de [...] minerales por medios físicos y mecánicos con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados [ganga] con el uso de las diferencias en sus propiedades” (MME, 2015).

**Cierre y abandono.** Finalización de la explotación, abandono de montajes y de infraestructura. Se le llama abandono a la fase del ciclo minero durante la cual tiene lugar la disminución gradual de la producción, se lleva a cabo la ejecución del plan de cierre de la mina y del plan de restauración geomorfológica y ambiental del área intervenida. En esta etapa se retiran los equipos e infraestructura. (MME, 2015).

En la siguiente figura se detallan estas etapas:

Figura 5.1. Etapas de un proyecto minero.  
Fuente: modificado de Ministerio de Minas y Energía, 2015.



### 5.1.1.1. MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

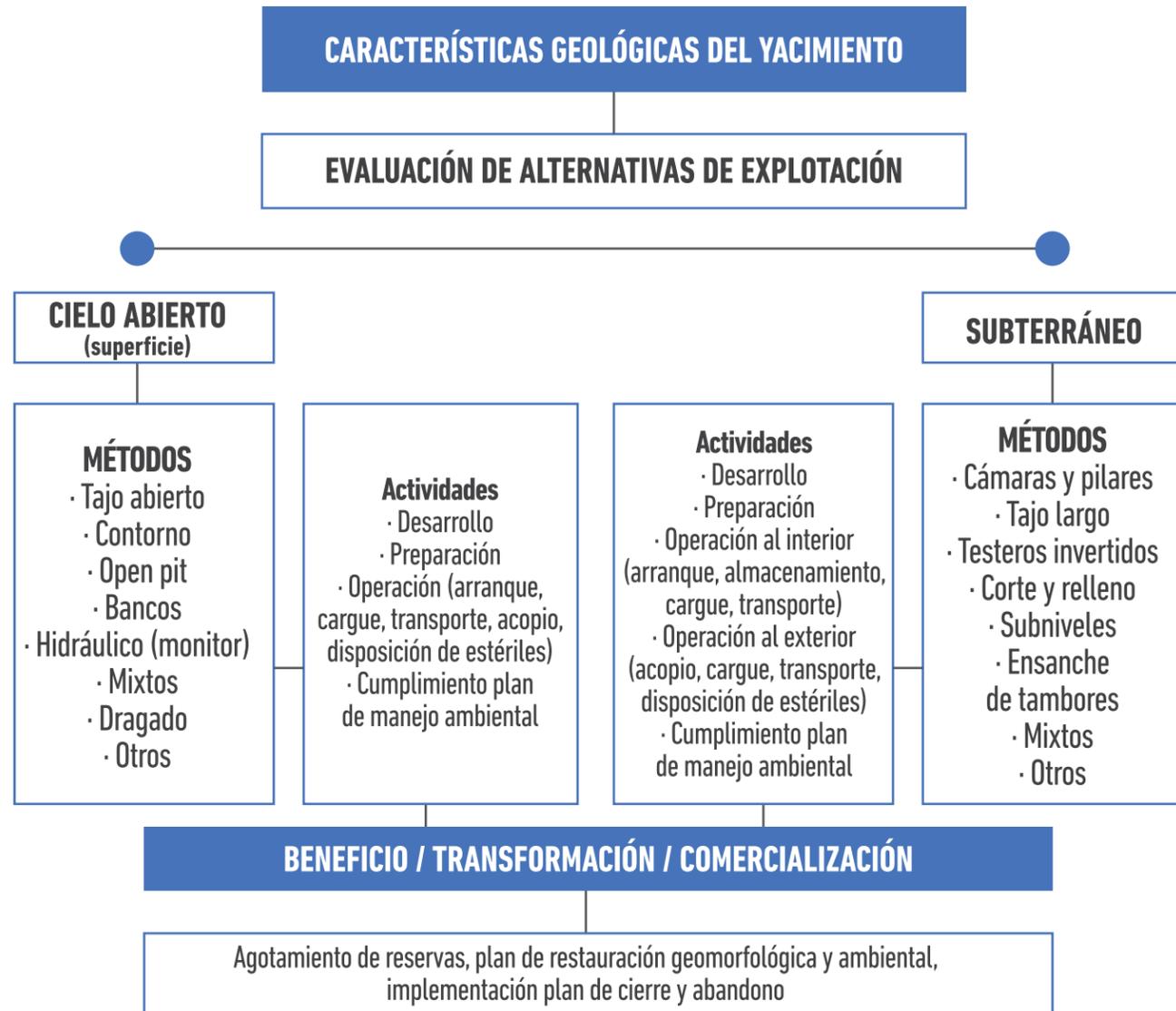
“Los métodos de explotación se definen como una forma geométrica usada para explotar un yacimiento determinado. Es el modo de dividir el cuerpo mineralizado en sectores aptos para el laboreo. Los métodos de explotación adoptados dependen de varios factores, principalmente, calidad, cantidad, tamaño, forma y profundidad del depósito; accesibilidad y capital disponible” (MME, 2015).

El método de explotación más viable será el que permita mayor recuperación de la inversión; adicionalmente, será el que se adapte mejor a las condiciones geológicas y geométricas del yacimiento. Se deben tener en cuenta la estabilidad de las rocas, el rumbo y buzamiento de la veta y de la roca de caja, el grosor de las vetas y adicionalmente el método debe permitir buenas condiciones de seguridad minera para los trabajadores. También se deberá definir si la explotación se realiza a cielo abierto o en subterráneo.

La minería a cielo abierto comprende las actividades y operaciones mineras desarrolladas en superficie para la extracción del mineral.

La minería subterránea comprende las actividades y operaciones mineras desarrolladas bajo tierra, o subterráneamente (figura 5.2).

Figura 5.2. Sistema y métodos de explotación. Fuente: modificado de Ministerio de Minas y Energía y Ministerio del Medio Ambiente (2001).



Algunos métodos de explotación subterráneos son los siguientes:

### Cámaras y pilares

En este sistema se construye una serie de aberturas de desarrollo horizontal o subhorizontal, con conexiones entre estas a intervalos regulares o irregulares que crean un patrón de cámaras y pilares. Los pilares de mineral se dejan para apoyar la roca que los recubre, pero en algunas minas, una vez que la minería ha alcanzado el límite del depósito, algunos o todos los pilares pueden retirarse para recuperarlos (Clark, Hustrulid y Mero, 2017). (figura 5.3. y 5.4.)

### Corte y relleno

Este método consiste en arrancar el mineral por franjas horizontales y verticales. Una vez extraída una franja, se rellena con material estéril, que sirve de piso de trabajo a los obreros y permite sostener las paredes de la cámara y, en algunos casos especiales, el techo.

Este sistema se puede adaptar a muchas formas diferentes de cuerpos de mineral y condiciones del terreno; junto con la minería de cámaras y pilares, es el método subterráneo más flexible.

Figura 5.3. Método de explotación por cámaras y pilares en yacimientos horizontales. Fuente: modificado de Clark, Hustrulid y Mero (2017).

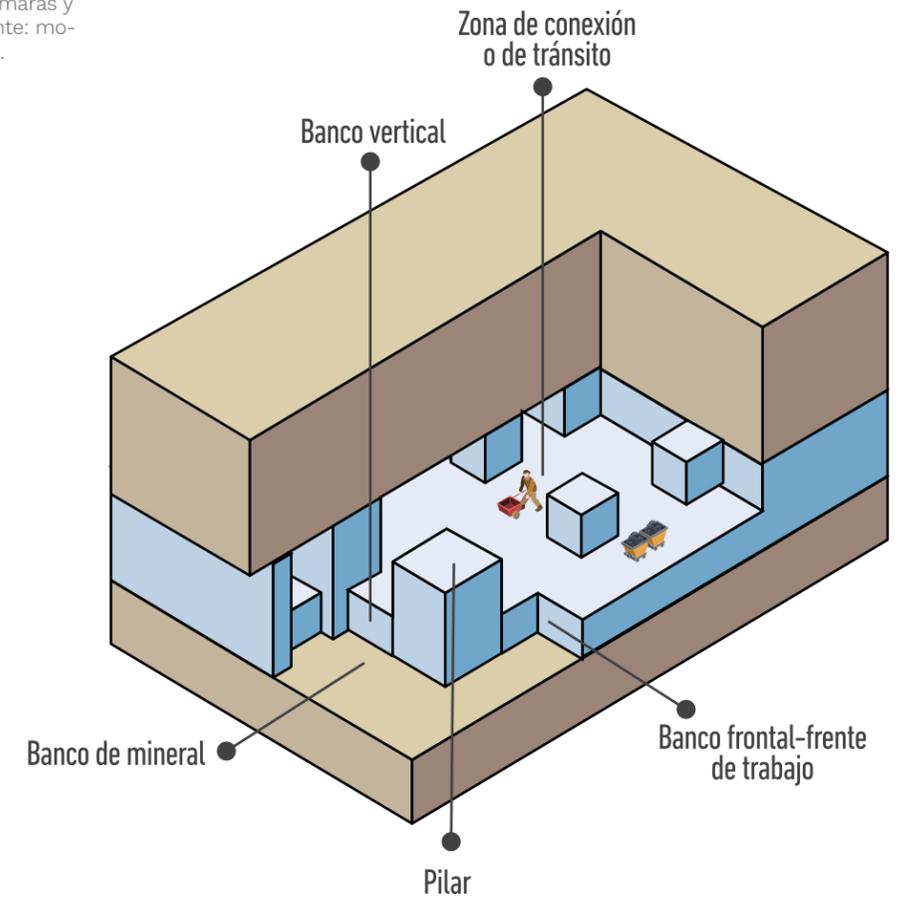
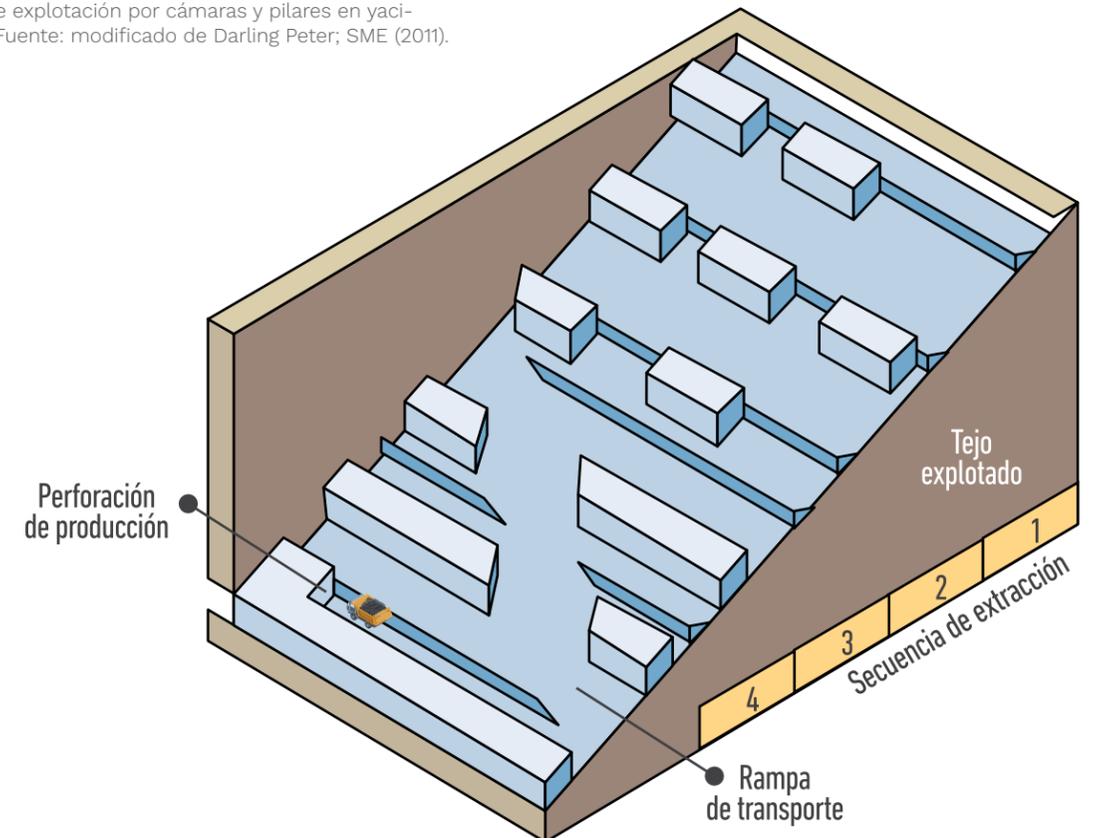


Figura 5.4. Método de explotación por cámaras y pilares en yacimientos inclinados. Fuente: modificado de Darling Peter; SME (2011).



En corte y relleno vertical, la variación más común, comienza en el nivel inferior y avanza hacia arriba. En esta técnica (Here are the types..., 2018), el mineral se excava en franjas horizontales, después de lo cual, la pendiente (espacio minado) se llena con roca de desecho y cemento (llamado relleno). Este relleno ayuda a soportar la roca que lo recubre y evita que se derrumbe, lo que garantiza la seguridad de los mineros y el equipo, además de permitir una ventilación adecuada, contribuye a proporcionar una superficie de trabajo para que los mineros excaven secciones más altas del depósito de mineral.

**Usos:**

- Depósitos masivos y verticales de mineral
- Depósitos con pendientes pronunciadas (ángulo con horizontal) y buena estabilidad
- Minerales de metales de alta ley, como oro, hierro, plata y cobre
- Cuerpos de mineral de forma irregular

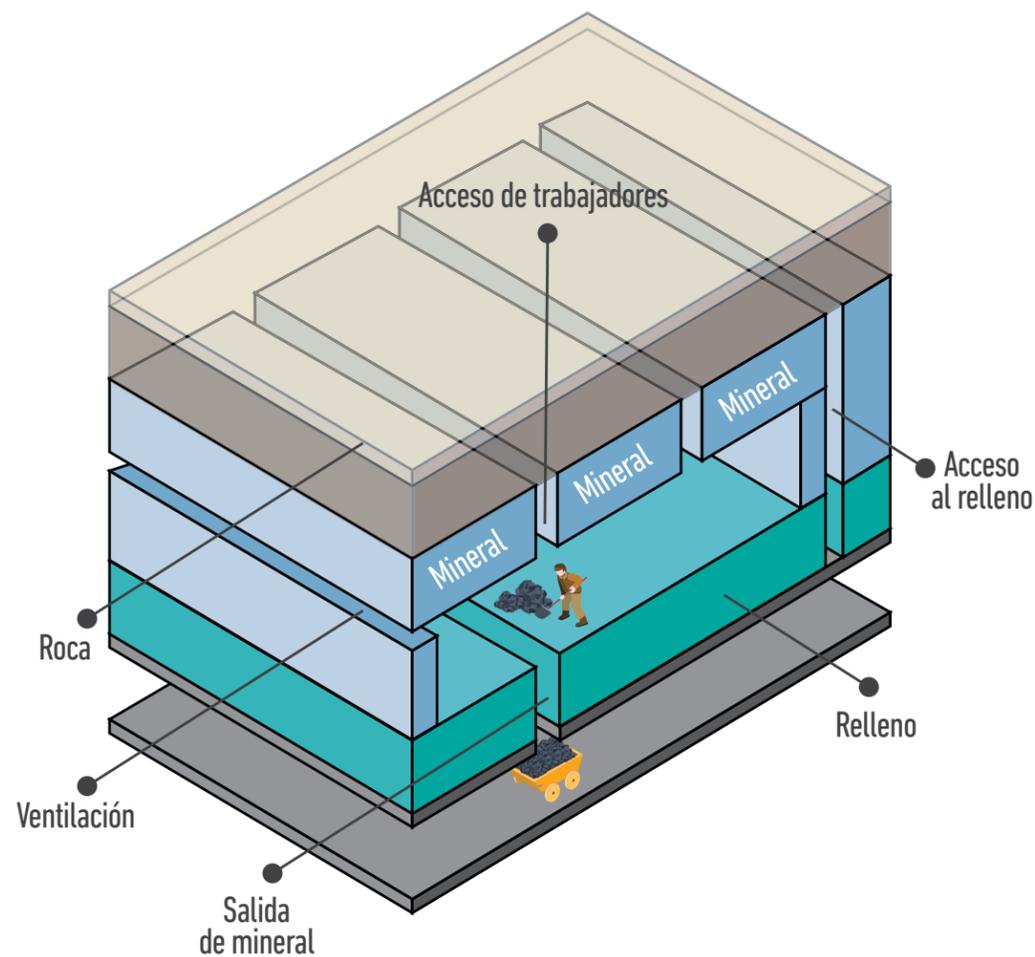
**Variaciones:**

Corte y relleno descendente: el trabajo avanza desde la parte superior hacia abajo. En este último caso, se debe agregar cemento al relleno para formar un techo resistente bajo el cual trabajar.

En la figura 5.5 se ilustra la minería de corte y relleno en forma escalonada, con acceso provisto por una rampa o túnel. La minería avanza hacia arriba.

Cuando las condiciones del terreno lo permiten, es posible utilizar una combinación de minería de corte y relleno, con subniveles o cámaras y pilares.

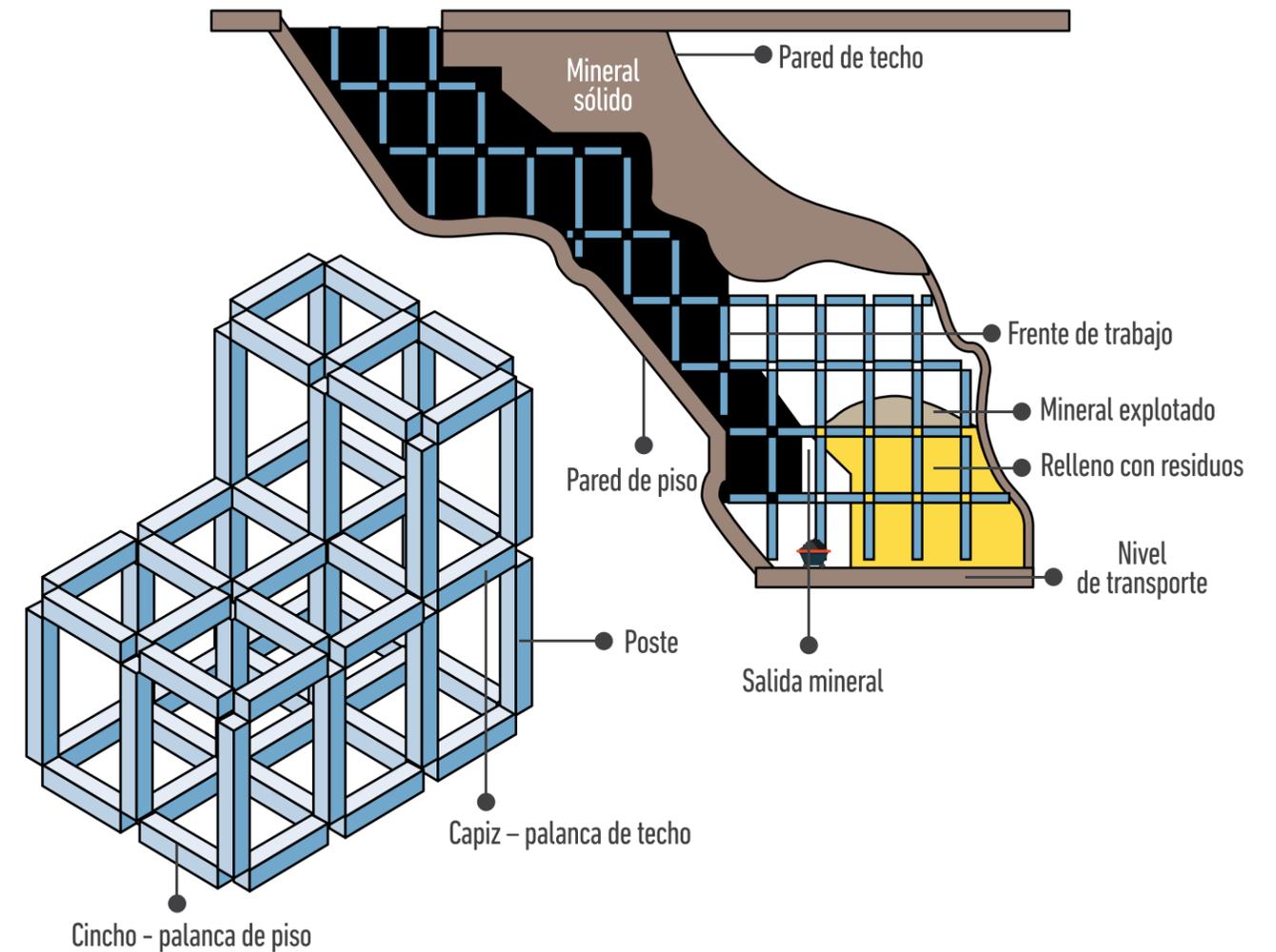
Figura 5.5. Método de explotación corte y relleno. Fuente: modificado de Here are the types... (2018).



**Cámaras con soporte en cuadros**

Es un método en el que las paredes y la parte posterior de la excavación están soportadas por un sistema de enclavamientos de madera enmarcados o conjunto de cuadros. Un conjunto cuadros de madera o sostenimiento (entibación) con cuadros consiste en un poste vertical y dos miembros horizontales establecidos en ángulos mutuamente rectos. El proceso de extracción es lento y solo se extrae suficiente mineral para proporcionar espacio para la instalación de cada conjunto sucesivo de madera. Las cámaras generalmente se extraen en pisos o paneles horizontales o verticales y los conjuntos de cuadros de cada piso sucesivo se enmarcan en la parte superior del piso anterior creando una red de sostenimiento. (911Metallurgist, 2017).

Figura 5.6. Método de explotación cámara con sostenimiento en cuadros. Fuente: modificado de 911Metallurgist (2017).



**Extracción selectiva (resue mining)**

Es un método de minería utilizado en vetas estrechas, donde la pared de roca adyacente a la vena se elimina cortando o excavando en pasos o capa por capa, lo que permite extraer el mineral en una condición más limpia, es decir controlando la dilución del mineral.

En este método la roca de la pared adyacente a la vena mineralizada, se retira antes de que se rompa el mineral o viceversa se realiza mediante el control de disparos de la voladura primero el mineral, luego la roca estéril o viceversa. Es empleado en vetas estrechas de menos de 30 pulgadas (76 cm), se produce un mineral más limpio que cuando se rompen la pared y el mineral juntos (Tuck Michael, 2008).

## Subniveles (sublevel stoping)

Es un método de explotación en el cual se extrae el mineral a través de tambores verticales, lo cual genera una excavación de grandes dimensiones, denominada cámara. El mineral arrancado se recolecta en embudos o teclas en la base o nivel de la guía de explotación.

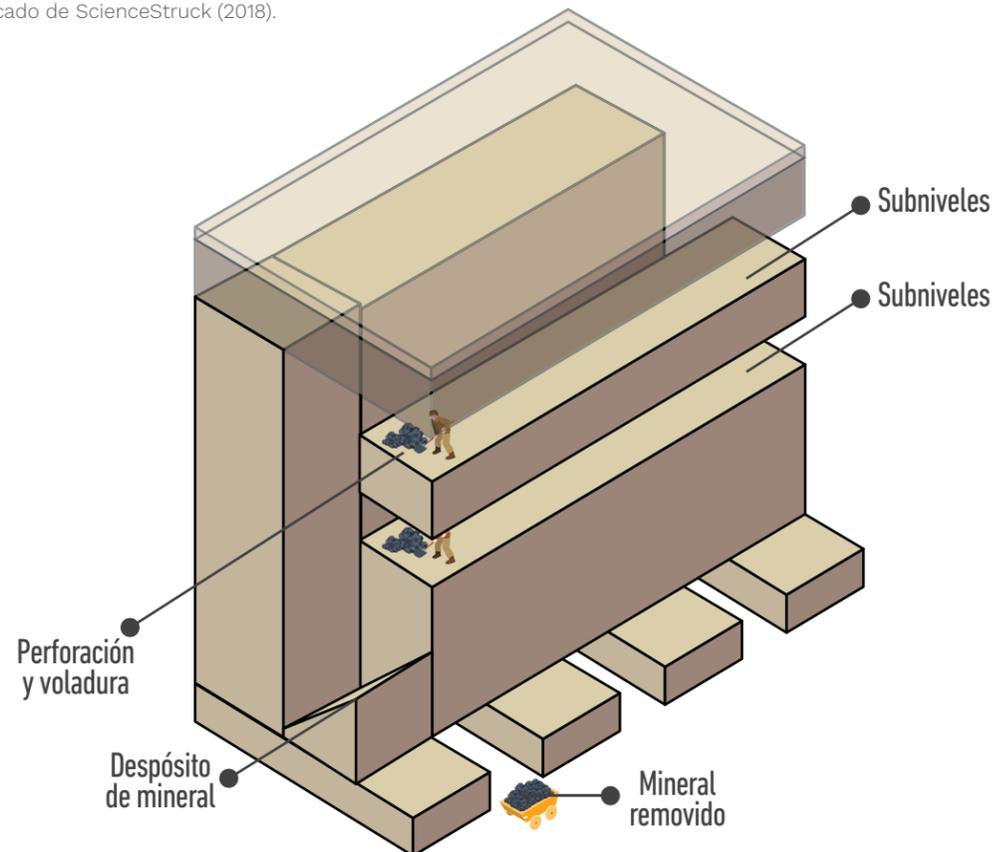
Este método se emplea en yacimientos tabulares de forma vertical o subvertical. Los siguientes son algunos parámetros que hay que tener en cuenta para utilizar este método de explotación:

- Forma: la forma del cuerpo mineralizado debe ser tabular y regular.
- Buzamiento Dip mayor de 50°. El buzamiento debe ser mayor que el ángulo de reposo del material quebrado.
- Geotecnia: la resistencia de la roca mineralizada debe ser moderada a competente, y la roca de caja debe ser competente.
- Tamaño de pilares: las características del mineral determinan el tamaño de los pilares y bloques, estructuras, calidad del macizo rocoso y condiciones operacionales.

El método por subniveles, o sublevel stoping, que se puede utilizar tanto en vetas angostas como en yacimientos masivos, permite tener distintos niveles de trabajo conectados a través de una rampa. Para desarrollar este método de trabajo se debe contar con lo siguiente (figura 5.7.):

- Un nivel base o galería de transporte y puntos de descargue o teclas de extracción
- Zanjas recolectoras de mineral que abarcan toda la extensión del nivel de producción
- Galerías o subniveles de trabajo localizados en altura conforme a la geometría del depósito
- Una galería de acceso a los subniveles de trabajo
- Pilares que harán las veces de soporte
- Tambor o chimenea para iniciar los trabajos de extracción en labor vertical (la extracción se puede hacer de manera ascendente o descendente)

Figura 5.7. Método por subniveles.  
Fuente: modificado de ScienceStruck (2018).



El método puede presentar variaciones para ajustarse a las condiciones de la mineralización. Por ejemplo, puede realizarse mediante subniveles en retirada (sublevel retreat), método en el que se requiere un solo nivel para llevar a cabo las actividades de producción; la extracción se realiza en un solo sentido.

## Método de tambores paralelos

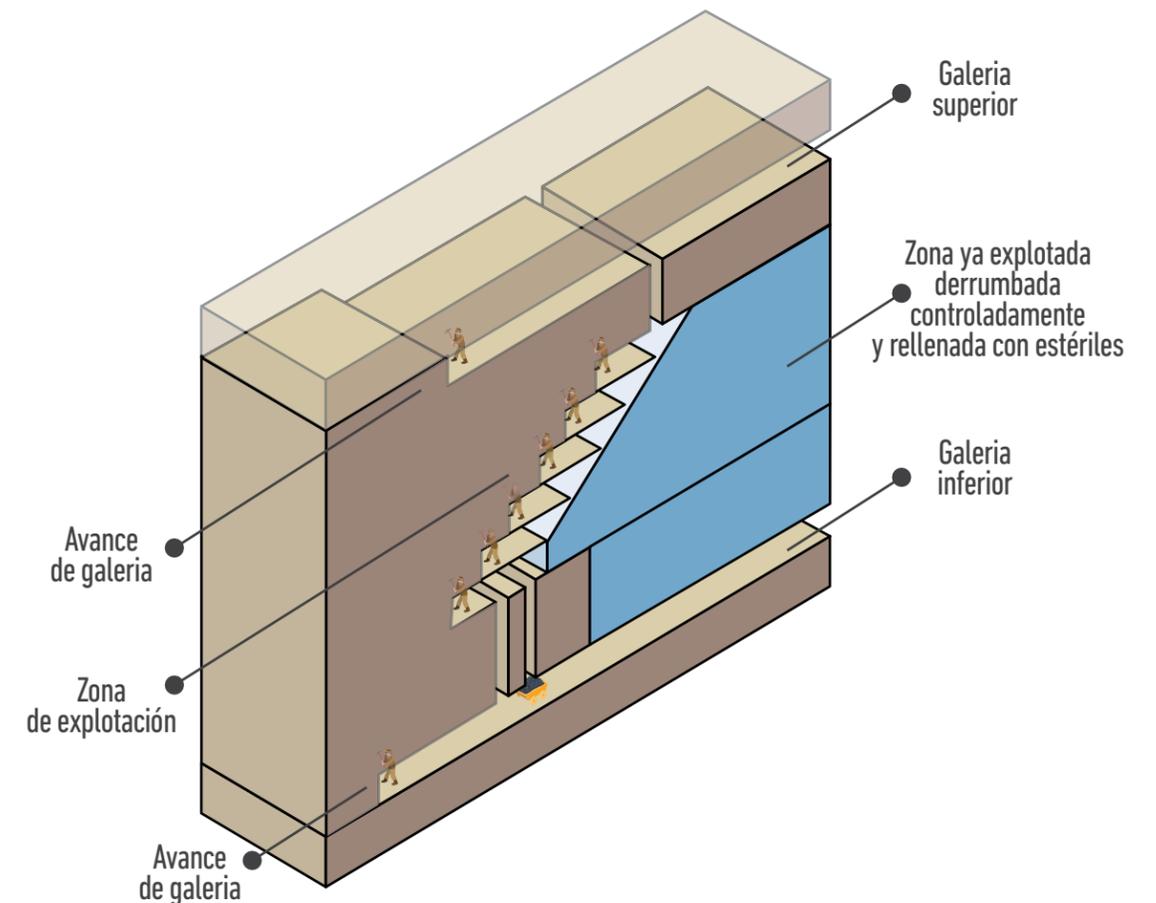
- Se utiliza en mineralizaciones con inclinaciones superiores a los 35°.
- Dependiendo de la dureza de los respaldos, se define si se requiere sostenimiento. Cuando los respaldos son inconsistentes se utiliza sostenimiento en cuadros.
- Los tambores avanzan por el filón siguiendo el buzamiento.
- Se construye un tambor para transporte de material y otro para transporte de personal.
- Se realiza avance en ascenso con frentes cortos y se van formando cámaras cuando los respaldos son competentes. El avance se realiza descendentemente y en frentes cortos cuando el buzamiento es fuerte (80° a 90°) (Sampedro Acevedo, 1988).

## Tajos largos diagonales con testeros o frentes cortos y relleno al piso

Este método es utilizado en yacimientos con fuerte buzamiento, para lo cual se realizan niveles de trabajo. Se parte de la galería superior o inferior y se abre un frente de trabajo que se va ensanchando, formando bloques escalonados que van progresando a medida que avanza la explotación.

El material explotado va cayendo por gravedad hasta la galería inferior de transporte. En vetas muy angostas requiere proceso de selección final para reducir la dilución de mineral, ver figura 5.8.

Figura 5.8. Método de explotación por testeros invertidos. Fuente: autores.



Este método de explotación es empleado en filones con fuerte buzamiento y pequeña competencia. Se practica en yacimientos de pendiente fuerte, principalmente mayores de 60°.

Los escalones son frentes cortos de explotación. En cada uno se ubica un trabajador que se sostiene en un planchón o soporte bajo el techo del mineral que se va a arrancar.

Se puede emplear relleno para controlar los vacíos.

Se inicia en una galería inferior o superior y se abre un frente de trabajo que se va ensanchando y formando bloques escalonados. El descargue se realiza por gravedad hasta la galería inferior, (Sampedro Acevedo, 1988).

## 5.1.2. MÉTODOS DE ARRANQUE

Esta operación corresponde a “la fragmentación del macizo rocoso hasta llevarlo a un tamaño que permita su manipulación para ser cargado y transportado. El arranque puede ser realizado con métodos mecánicos (forma continua y discontinua) y también por medio de la perforación con sustancias explosivas (forma discontinua).

”**Arranque continuo.** Se realiza por medio de la interacción mecánica de una herramienta, máquina o pieza sobre la roca para superar su resistencia y cohesión. [...] permite una extracción y un transporte en forma continua, como, por ejemplo: rozadora, rotopalas, minadores, dragas, entre otros.

”**Arranque discontinuo.** En este tipo de arranque hay unos procedimientos cíclicos e iterativos donde las técnicas más comunes son las siguientes: aplicaciones mecánicas, eléctricas, la energía química (explosivos), el láser, el calor, energía hidráulica.

Figura 5.9. Arranque manual y herramientas. Fuente: autores.



”**Arranque mecánico.** En este tipo de arranque se usan máquinas que utilizan los impactos, el rozado, la fuerza hidráulica, el rpiado o la excavación para desprender el mineral. [...] Se usan máquinas de impactos, tales como martillo hidráulico, martillo eléctrico y martillo neumático [o herramientas manuales]” (MME, 2015).

El **arranque manual** con picos y cinceles y mazos se realiza principalmente para arrancar minerales blandos o de textura media.

El **arranque con martillo** picador se realiza con aire comprimido y es empleado en rocas de dureza media.

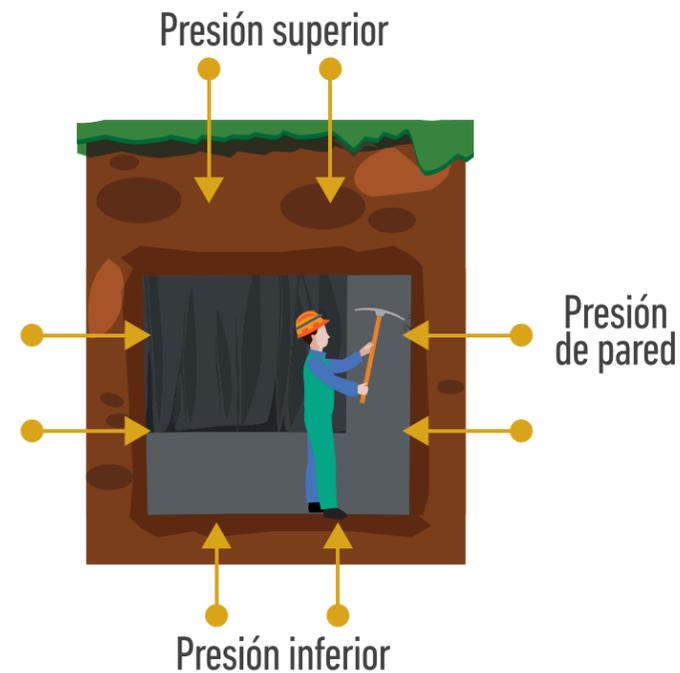
El **arranque con explosivos** se utiliza para fragmentar rocas duras y se complementa con martillo picador o martillo manual.

## 5.1.3. TIPOS DE SOSTENIMIENTO

Toda excavación subterránea genera presiones a su alrededor, causadas por el propio peso de las rocas que se encuentran por encima y a los lados del túnel, y por la redistribución de esfuerzos, producto del espacio generado. Ver figura 5.10.

Para garantizar la seguridad de la labor minera es necesario determinar si se necesita implementar un método de sostenimiento de la roca que se está trabajando. Las características de la roca se determinan mediante estudios geológicos y geotécnicos detallados que permitan determinar si esta es estable o inestable (ARL Positiva, 2017).

Figura 5.10. Presiones en una explotación minera. Fuente: autores.



**Estos son los tipos de sostenimiento en minería subterránea:**

**Sostenimiento natural.** Se utiliza en rocas fuertes, estables y resistentes, cuando la roca soporta resistencia a la compresión y a la tensión. El techo y el piso deben ser competentes. Para el sostenimiento natural también se utilizan soportes de material de la misma mina, como son machones y pilares, que se conforman con el mineral y soportan las presiones de la excavación.

**Sostenimiento artificial.** Se utiliza cuando la roca que se trabaja presenta fallas estructurales, diaclasamientos, y por sus condiciones naturales no presenta suficiente competencia para sostenerse naturalmente. Por lo tanto, para garantizar la seguridad de la explotación y del personal se requiere implementar el sostenimiento artificial, que puede consistir en la entibación con madera, con puertas de madera, como la alemana, medias puertas, canastas o cuadros, entre otras. En las construcciones y explotaciones tecnológicamente más avanzadas se utilizan arcos de acero y pernos de anclaje.

El explotador minero debe garantizar que el área de las labores definidas para el transporte sea suficien-

temente amplia, de tal forma que los equipos utilizados puedan circular sin tocar los respaldos (paredes) ni el techo, para no alterar el sostenimiento en dichas labores. Ver figura 5.11.

Figura 5.11. Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial. Clases según Brown. Fuente: Hoek E & Brown E. T. (2007).

CLASE	CLASIFICACIÓN DE ROCA SEGÚN RESISTENCIA	RESISTENCIA UNIAxIAL (MPa)	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL (MPa)	ESTIMACIÓN EN TERRENO DE LA RESISTENCIA	EJEMPLOS DE ROCA
R6 (A)	Extremadamente resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico sólo causan descostramientos superficiales de la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita.
R5	Muy resistente	100 - 250	4 - 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba.
R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, mármol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras.
R3	Moderadamente resistente	25 - 50	1 - 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarra, limolitas.
R2	Débil	5 - 25	(B)	Un golpe con la punta del martillo geológico de una indentación superficial. La roca puede ser descostrada un cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy débil	1 - 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o muy meteorizada.
R0	Extremadamente débil	0.25 - 1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

A. Clase según Brown.

B. para rocas con una resistencia en compresión uniaxial menor que 25 MPa, los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables.

Figura 5.12. Tipos de sostenimiento. Fuente: autores.



Área mínima de excavación minera. El área mínima libre de una excavación minera debe ser de 3 m<sup>2</sup>, con una altura mínima de 1,80 m (MinMinas, 2015b).

El análisis de la mecánica de las rocas y sus estructuras geológicas, fallas, diaclasamiento, dureza y resistencia es de gran importancia para definir el sostenimiento que conviene implementar en la labor minera. Para esto hay que realizar análisis de laboratorio con miras a establecer la resistencia a la compresión y tensión de la roca de caja y de respaldos. De manera preliminar se pueden identificar en terreno las características de resistencia de la roca con las clases de roca según Hoek y Brown (1997), que se presentan en la siguiente tabla, sin dejar de lado los estudios estructurales, geológicos y análisis de laboratorio.

### 5.1.4. TIPOS DE VENTILACIÓN

El caudal de aire es la cantidad de aire que ingresa a la mina y que sirve para ventilar labores mineras subterráneas y garantizar el oxígeno para el personal que se encuentra en el interior de la mina.

La ventilación de una mina consiste en el proceso de hacer pasar un flujo de aire considerable y necesario para crear las condiciones óptimas para que los trabajadores se encuentren en una atmósfera agradable, limpia y sin gases. Para ello se establece un circuito para la circulación del aire a través de todas las labores.

**La ventilación natural:** Consiste en el paso natural de un flujo de aire por las labores mineras. Para que el circuito de aire se dé es necesario contar con dos accesos para la entrada y salida de aire, los cuales deben tener diferencia de cotas o nivel. La diferencia de temperatura y presión barométrica genera una diferencia de peso específico entre el aire saliente y el entrante; esto hace que se genere el circuito de ventilación natural.

La mayoría de las minas han utilizado el sistema de ventilación natural; sin embargo, el artículo 40 del Decreto 1886 de 2015 establece que “toda labor subterránea debe contar con un circuito de ventilación forzada”. Ver figuras 5.13 y 5.14.

**Ventilación Artificial:** corresponde al caudal de aire que ingresa a la mina y que se produce como resultado de un efecto mecánico o ventilador.

Figura 5.13. Valores límites permisibles para gases contaminantes. Fuente: Minminas, 2015, Decreto 1886. Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas.

CLASIFICACIÓN	GASES	FÓRMULA	TLV-TWA (ppm)	TLV-STEL (ppm)
Sofocante-venenoso	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	5.000	30.000
Asfixiante-venenoso Explosivo	Monóxido de carbono	CO	25	-
Explosivo Venenoso Olor a huevo podrido	Acido Sulfhidrico	H <sub>2</sub> S	1	5
Asfixiante inflamable	Anhidrido sulfuroso	SO <sub>2</sub>	-	0.25
Asfixiante	Oxido Nitrico	NO	25	-
Asfixiante	Dioxido de Nitrogeno	NO <sub>2</sub>	0.2	-
Explosivo sofocante	Metano	CH <sub>4</sub>	-	-
Soporte de la combustión	Oxígeno	O <sub>2</sub>	El volumen mínimo de oxígeno para trabajar en una labor bajo tierra es de 19.5% y máximo de 23.5%.	

**VLP-TWA:** Corresponde al valor límite permisible de tiempo promedio ponderado para una jornada de 8 horas diarias y 40 horas a la semana de trabajo.

**VLP-STEL:** Valor límite permisible para un corto tiempo de exposición, el cual no debe exceder de 15 minutos; debe existir por lo menos un lapso de 60 minutos entre dos exposiciones sucesivas a este nivel y no más de 4 veces en la jornada de trabajo.

Estos son los sistemas de ventilación artificial:

**Sistema Soplante o impelente:** Caudal de aire impulsado por un ventilador hacia el interior de la mina. Para conducir el aire se utilizan mangueras o mangas de plástico o de materiales flexibles.

**Sistema aspirante.** El aire fresco ingresa al frente por la galería, y el contaminado es extraído por mangueras de plástico (mangas) o conductos conectados al ventilador aspirante. Las mangueras o mangas deben tener un anillado en espiral rígido para soportar la succión de aire.

**Sistema combinado aspirante-soplante (impelente).** Emplea dos tendidos de mangueras de plástico (mangas) o conductos: uno para extraer aire y el segundo para impulsar aire limpio al frente en avance. (ARL Positiva, 2017).

Para garantizar la seguridad del personal al interior de la mina es necesario controlar los aspectos contaminantes y explosivos como son las partículas de polvo y los gases.

Las concentraciones máximas de metano (CH<sub>4</sub>) permitidas y a partir de las que se deben suspender los trabajos y evacuar el personal de manera inmediata hasta que se haya diluido el metano por debajo de los límites máximos permisibles establecidos, los cuales se presentan en la figura 5.15.

Figura 5.15. Concentraciones máximas de metano (CH<sub>4</sub>). Fuente: Minminas, 2015, Decreto 1886. Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas.

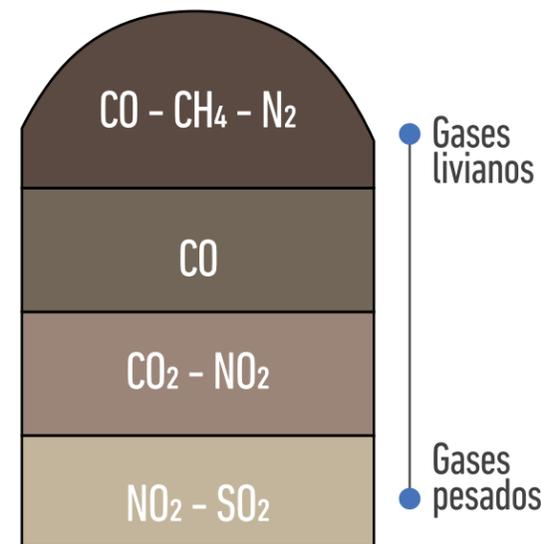
LABOR SUBTERRANEA	PORCENTAJE (%) MÁXIMO PERMISIBLE DE METANO (CH <sub>4</sub> )	PORCENTAJE (%) LEL
EN LABORES O FRENTE DE EXPLOTACION O AVANCE	1.0	20%
EN LOS RETORNOS PRINCIPALES DE AIRE	1.0	20%
EN EL RETORNO DE AIRE DE LOS TAJOS	1.5	30%
EN EL RETORNO DE AIRE DE LOS FRENTE DE PREPARACION Y DESARROLLO	1.5	30%

**Porcentaje LEL:** El límite inferior de explosión (LEL) corresponde al la concentración (en Volumen %) de una mezcla de gas combustible y aire que puede inflamarse y ocasionar explosión.

### 5.1.5. CARGA Y TRANSPORTE DE MINERAL

En las minas, después de haber arrancado el mineral y el material estéril, hay que cargarlo a un medio de transporte por medios manuales, con palas y carretillas, baldes o katangas (amarre para cargar en la espalda del minero el mineral en baldes o costales), o por medios mecanizados, con palas neumáticas o mecánicas, cargadores para minería subterránea, winche minero, pancer o transportador blindado, bandas transportadores, malacates, locomotoras con vagones para trasladarlo hasta la superficie, al patio de acopio o a la planta de beneficio.

Figura 5.14. Ubicación de gases contaminantes en la mina. Fuente: autores



## 5.2. ESTUDIO MINERO DE LA ZONA MINERA

“Como se mencionó anteriormente, la minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) es la extracción de oro realizada por mineros independientes o compañías pequeñas que cuentan con un capital de inversión y de producción limitados. En general para producir el oro, la mena se extrae de la tierra y se procesa por medio de muchas técnicas manuales o semimecanizadas para luego convertirse en un bien de valor a través de la venta. La MAPE es distinta a la minería en gran escala (MGE), que produce oro en escala mayor y utiliza métodos de explotación y procesamiento totalmente mecanizados. Las MAPE suceden principalmente en zonas rurales de 81 países en desarrollo. Es un productor de oro importante y también el mayor empleador en la minería del oro, pues representa alrededor del 20% (400-600 t/año) de la producción mundial de oro (3200 t/año) y emplea al 90% de los mineros de oro en el mundo. A nivel mundial, las MAPE pueden ser formales o informales, dependiendo de las leyes de cada país y de la capacidad de los mineros para cumplir estas leyes. Sin embargo, la MAPE es reconocida por muchos países y por instituciones mundiales de desarrollo internacional, tales como las Naciones Unidas y el Banco Mundial, como un mecanismo significativo de alivio de la pobreza y una oportunidad importante para el desarrollo. Los ingresos de las MAPE pueden ser de dos a diez veces mayores a los encontrados normalmente en economías agrarias”. (O’neill y Telmer, 2017).

Las pequeñas extracciones de oro estudiadas se localizan en las veredas San Matías, Mina Raa-William y El Alacrán, y desarrollan su actividad en áreas que actualmente se encuentran en títulos mineros de la empresa Cordoba Minerals S.A.S. Para ello se realizaron acuerdos y subcontratos entre los titulares y los pequeños mineros.

### Metodología de trabajo:

Las siguientes actividades se realizaron para el análisis minero:

- Revisión de antecedentes mineros del departamento de Córdoba, como estadísticas de la Agencia Nacional de Minería, informes, estudios geológicos de la región.
- Preparación de formulario de recolección de información de campo en los aspectos mineros.
- Reconocimiento cartográfico de la zona, topografía, geología, localización de las minas a visitar.
- Contacto telefónico con representantes de la actividad minera en Puerto Libertador.

**MAPE:** La minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) es la extracción de oro realizada por mineros independientes o compañías pequeñas que cuentan con un capital de inversión y producción limitados. Normalmente es un sistema de producción descentralizado. Algunos gobiernos la definen por la magnitud de la mena procesada (p. ej., menos de 300 toneladas al día) y otros la definen por los métodos de extracción y procesamiento utilizados (p. ej., técnicas manuales o semimecanizadas). (Determinación del uso del mercurio en el sector de la minería de oro artesanal y en pequeña escala MAPE, (ONU, 2017).

Las explotaciones pequeñas son extracciones sin técnica y de poca profundidad, que se realizan “con herramientas e implementos simples de uso manual, accionados por la fuerza humana, y cuya cantidad extraída no sobrepase en ningún caso a las doscientas cincuenta (250) toneladas anuales de material”, (MME,2015).

Para este capítulo se define como una mina artesanal aquella que se explota sin técnica minera específica o que combina las prácticas empíricas con algunas técnicas mineras, en la cual se han ido incorporando herramientas y equipos para lograr mayor productividad.

- Planeación de las actividades de campo.
- En la zona se identificaron las minas que se podían visitar para desarrollar los temas mineros, para la selección de las minas se tuvieron en cuenta los temas de seguridad, facilidades de acceso y cronograma de trabajo.
- Socialización con los mineros de las actividades a desarrollar.
- Un equipo técnico compuesto por un Ingeniero de Minas, un Geólogo y un delegado de la mina realizaron un recorrido de reconocimiento, esto para las minas seleccionadas, en cada día de trabajo.
- La información recopilada corresponde a la captación de información visual y escrita capturada en campo y en un formato tipo encuesta que se aplicó con las personas que acompañaba el recorrido de la visita de la mina.
- Para la elaboración del informe de descripción y análisis el Ingeniero de Minas utilizó los datos de campo para describir de cada MAPE los aspectos como son sistema y método de explotación, método de arranque, sostenimiento minero, tipo de Ventilación, cargue y transporte de material, aspectos ambientales mineros.
- La información del capítulo geológico se incorporó tanto en la descripción de las mineralizaciones como para identificar de manera preliminar métodos de explotación que se pueden aplicar en las diferentes vetas.
- Se elaboraron consideraciones técnicas a manera de recomendaciones para el mejoramiento de las explotaciones y la seguridad del personal.

### 5.2.1. MINAS VISITADAS

Las minas estudiadas son artesanales y en pequeña escala (MAPE) y para este estudio se clasificaron según el avance minero, las herramientas y técnicas utilizadas como mina artesanal o pequeña explotación. Así:

Las cinco minas artesanales (MAPE) que fueron caracterizadas en este proyecto son las siguientes: Terán, Buenos Aires, Piritá, El Alacrán, Raa.

### 5.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD MINERA

En las siguientes tablas se describen los aspectos mineros que caracterizan las explotaciones MAPE visitadas:

- Sistema y método de explotación
- Método de arranque
- Sostenimiento minero.
- Tipo de Ventilación.
- Cargue y transporte de material
- Aspectos ambientales mineros.

#### 5.2.2.1. MINA ARTESANAL TEHERÁN

Esta explotación minera artesanal se desarrolla desde hace más de 30 años. Tanto en la explotación como en los procesos de beneficio del oro participan aproximadamente 45 personas que en su mayoría pertenecen a la Familia Teherán.

La explotación minera se encuentra en un área titulada por la empresa Minerales Córdoba S.A.S., por lo cual se concertó y adelantó un proceso de formalización minera apoyado por el Ministerio de Minas y Energía en los trámites administrativos. El subcontrato de formalización de la mina Teherán es JJ9-08091-001, para un área de 3,52 hectáreas.

En las siguientes fotografías se visualizan las actividades de la Mina Artesanal de pequeña escala Teherán.



Fotografía 5.1. Tablero informativo MAPE Teherán. Fuente: Autores.



Fotografía 5.2. Explotación manual de mineral dejando taludes altos con pendientes verticales. Fuente: Autores.

La información recopilada en campo durante la visita a la Mina Teherán permitió sintetizar las siguientes características:

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	<b>Mina Teherán</b>
VEREDA	San Matías. Corregimiento de San Juan Viejo.
SISTEMA	En superficie (cielo abierto).
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carretable.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Mina Artesanal Teherán: extracción de materiales en superficie, mediante desprendimiento y arranque manual de material. La explotación se enfoca en el saprolito que se localiza en la parte más superficial, así como en las rocas que presenten enriquecimiento.  La explotación minera se desarrolla de manera artesanal, principalmente manual. En la mina artesanal no se encuentra un método de explotación definido debido a que se realiza arranque directo tanto en las bases y puntos intermedios de los taludes sin conformación de niveles o bancos y también se realizan excavaciones a nivel del suelo las cuales se van profundizando.
FORMA DE VENTILACIÓN	Explotación en superficie. No requiere ventilación artificial.
SOSTENIMIENTO	La extracción de material se realiza principalmente en la base de las laderas que presentan alturas entre 8 a 30 m. Se evidenciaron taludes invertidos y zonas susceptibles a desprendimientos y accidentes.
FORMA DE ARRANQUE	Herramientas manuales tipo palas y picas, cinceles y martillos. fracturamiento de roca con insumos y herramientas artesanales.
CARGUE Y TRANSPORTE	Carretillas manuales, cajones y semovientes (equinos).
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Inestabilidad de taludes por excavación en las bases. Presencia de procesos erosivos y sedimentos en las aguas de escorrentía.
No DE PERSONAS VINCULADAS	El área de explotación es dividida en cinco sectores donde en cada sector trabajan dos personas uno (1) para el arranque y un (1) palero-arriero, que carga el material removido en los cajones y lo transporta hasta la planta de beneficio. En el frente de explotación laboran generalmente 10- 15 mineros. En el área se encuentran 9 molinos californianos para el proceso de beneficio. En esta actividad participan grupos de 2 a 3 personas por molino.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	Tenor reportado: 2 gr /ton. Producción reportada dos (2) ton/día por frente.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Molinos californianos y concentración gravimétrica.

### 5.2.2.2. PEQUEÑA EXPLOTACIÓN MINERA BUENOS AIRES

La explotación minera Buenos Aires se localiza en el corregimiento San Juan Viejo. Esta actividad se ha desarrollado de manera artesanal en área de un título minero de la empresa Minerales Cordoba S.A.S., con la que se realizó un subcontrato de formalización minera con n.º LCP-08142-002. El proceso es apoyado por grupo de formalización del Ministerio de Minas. El área del subcontrato es de 3,3956 hectáreas.



Fotografía 5.3. Pequeña explotación Buenos Aires. Fuente: Autores.

La información de la mina Buenos Aires se sintetiza en la tabla siguiente:

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	<b>Mina Buenos Aires</b>
VEREDA	Buenos Aires - San Juan Viejo.
SISTEMA	En superficie (cielo abierto).
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carretable desde Puerto Libertador hasta San Juan Viejo, luego se continúa por sendero o trocha.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Extracción de materiales en superficie, mediante desprendimiento frontal de material de los taludes. Se cuenta con un frente de explotación y el arranque se realiza de manera directa y frontal. Sin contar con una técnica definida. El frente de explotación tiene 5m de altura y 30 m de ancho. Los mineros están realizando apertura de labores subterráneas en búsqueda de la mineralización, al momento de la visita las labores se encontraron derrumbadas.
FORMA DE VENTILACIÓN	Explotación en superficie. No requiere ventilación artificial.
SOSTENIMIENTO	La extracción de material se realiza principalmente en la base de las laderas dejando taludes con pendientes negativas y zonas que pueden desprenderse y ocasionar accidentes.
FORMA DE ARRANQUE	Herramientas manuales como palas y picas, cinceles y martillos. fracturamiento de roca con insumos y herramientas artesanales.
CARGUE Y TRANSPORTE	Carretillas manuales, malacate manual desde el frente hasta los molinos californianos de beneficio.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Inestabilidad de taludes por excavación en las bases. Presencia de procesos erosivos y contaminación con sedimentos de las aguas de escorrentía.
No DE PERSONAS VINCULADAS	Cinco (5) personas en el frente de explotación. El área de explotación trabajan dos personas (2) para el arranque y tres (3) para el transporte del material y oficios varios.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	Reportan: 6gr/ton. Una (1) ton/día.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Molinos californiano y concentración gravimétrica.

### 5.2.2.3. MINA ARTESANAL PIRITA

La mina artesanal Pirita ha sido explotada por más de cuarenta años por aproximadamente cinco familias, entre ellas la familia Montiel. En la explotación minera y el beneficio trabajan quince personas.

La explotación artesanal se encuentra en área de un título minero de la empresa Córdoba Mineral S.A.S., con la cual se realizó un subcontrato de formalización minera con placa n.º LEQ-15161-001. Resolución de aprobación n.º 1307 de 30 de julio de 2017. El subcontrato de formalización cuenta con un área de 4,98 hectáreas.



Fotografía 5.4. Escalera tipo niveles estilo segoviano para ingreso a los niveles 1, 2 y 3. Fuente: Autores.



Fotografía 5.5. Bocamina en clavada y ventilador tipo Bufalo. Fuente: Autores.

La explotación de la mina Pirita se ha desarrollado por más de diez años en la zona y representa una fuente de ingresos para las familias de la vereda. Las principales características observadas en la visita de campo son las siguientes:

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina Pirita
VEREDA	San Matías.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Acceso por vía carretable.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Extracción subterránea. Método de explotación sobre guías con longitudes entre 15- 30 metros. En la explotación se han desarrollado cinco guías o subniveles de las cuales solo se encontraron en operación las más profundas en los niveles 4 y 5. El acceso a la labor se hace por una clavada o tambor vertical con escaleras en caracol tipo segoviano. La sección del tambor es de 1.50 x 1.50m con profundidad de 36m.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación artificial con ventilador tipo búfalo con motor de 7.5 hp. Este es un ventilador soplante y mangas plásticas de diámetro de aproximadamente 15".
SOSTENIMIENTO	En la clavada se encuentra con sostenimiento en cuadros y forro hasta los primeros 15 metros del acceso y luego continua con sostenimiento natural debido a que la roca ha demostrado ser competente. En las sobre guías el sostenimiento es natural, debido a que la roca ha sido estable. La roca de respaldos corresponde a roca hidrotermal silicificada.
FORMA DE ARRANQUE	El arranque se realiza con martillos perforadores y fracturamiento de roca con insumos y herramientas artesanales.
CARGUE Y TRANSPORTE	El cargue interno se realiza de manera manual en baldes y carretas y se carga en un malacate artesanal mecánico.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	El material estéril se arroja en los alrededores de la mina.
No DE PERSONAS VINCULADAS	10 -15 personas.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	Tenor reportado 12-25 gr/ton. Producción de mineral: 4 ton/día. Producción de estéril: 8.3 ton/día.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	El beneficio se realiza mediante un molino californiano, remolienda con molino de bolas y concentración gravimétrica en canalón.

#### 5.2.2.4. MINA ARTESANAL RAA

La mina Raa se localiza en la vereda William-Mina Raa y se ha explotado de manera artesanal por más de doce años. Actualmente la mina se encuentra en un área de título minero de la empresa Minerales Cordoba S.A.S. Para garantizar la continuidad de la explotación la empresa creó un subcontrato de formalización minera con placa n.º LCP-08142-001, resolución de aprobación n.º 1742, de 23 de mayo de 2016. El subcontrato de formalización cuenta con un área de 4,6595 hectáreas.



Fotografía 5.6. Labores exploratorias en la mina Raa. Fuente: Autores.

La mina artesanal RAA cuenta con cuatro galerías, de las cuales solo se encontró activa una; las otras fueron abandonadas por motivos de operatividad del actual explotador minero. La explotación se realiza por medio de guías, inclinados y tambores, siguiendo la mineralización. La labor actual se encuentra en desarrollo debido a que solo cuenta con una longitud de 35 metros. La información recopilada en la visita de campo se condensa en la siguiente tabla.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina Raa
VEREDA	Willian -Mina RAA Corregimiento San Juan Viejo.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Acceso por vía carretable hasta el Punto Denominado William y continua por sendero o trocha.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Explotación subterránea en sobre guías, inclinados y tambores siguiendo la veta. La sección promedio se encuentra entre alto entre 2m a 4.5 m de altura y ancho de 1.15m a 1.50m. la longitud de la galería activa es de 35m.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación natural.
SOSTENIMIENTO	Sostenimiento natural en roca hidrotermal silicificada.
FORMA DE ARRANQUE	El arranque se realiza con martillos perforadores neumáticos y fracturamiento de roca con insumos y herramientas artesanales.
CARGUE Y TRANSPORTE	El cargue se realiza de manera manual y se utilizan baldes y carretas.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	El material estéril se arroja en los alrededores de la mina.
No DE PERSONAS VINCULADAS	4 -5 personas.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	0,5 - 1 ton/día. 5 gr/ton.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Se cuenta con dos molinos continuos molienda y remolienda y concentración gravimétrica.

### 5.2.2.5. MINA ARTESANAL EL ALACRÁN

La mina artesanal El Alacrán se localiza en el corregimiento de San Juan Viejo, en la vereda que lleva el mismo nombre de la mina. Allí, numerosas familias locales y foráneas han realizado explotación minera por más de treinta años. Las explotaciones son superficiales (máximo de 100 m de profundidad), y debido a que la explotación se ha realizado sin planificación, las labores se entrelazan o cruzan, lo cual debilita el sostenimiento de las labores aledañas. En el momento de la visita, alrededor de treinta personas se encargaban de la explotación, cada una de las cuales puede ser responsable de una o varias labores mineras. En cada labor minera activa se pueden vincular entre tres y ocho operarios. Las familias de los mineros habitan en el caserío.



Fotografía 5.7. Zona Minera El Alacrán. Fuente: Autores.



Fotografía 5.8. Labores de explotación. Fuente: Autores.



Fotografía 5.9. Malacate para la extracción de mineral. Fuente: Autores.



Fotografía 5.10. Clavada para labores subterráneas. Fuente: Autores.



Fotografía 5.11. Ventilador tipo bufalo. Fuente: Autores.



Fotografía 5.12. Descenso a la clavada. Fuente: Autores.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	El Alacrán
VEREDA	El Alacrán.
SISTEMA	En la zona se encuentran labores en Superficie y principalmente labores subterráneas.
LABORES DE DESARROLLO	Se cuenta con vía carretablea.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	En superficie: Extracción de materiales en superficie, mediante desprendimiento de material de los taludes. El frente de explotación cuenta con altura aproximada de 60m y ancho aproximado de 80 m. Subterránea: Se reportó que en la zona se encuentran 100 trabajos subterráneos de los cuales 25 son activos y 75 intermitentes y 25 entables. Las explotaciones se realizan mediante guías siguiendo la dirección de la veta, la mayoría de labores de desarrollo para ingreso a la pequeña explotación se realiza mediante clavadas y en menor cantidad el acceso se realiza por medio de guías. Las labores son superficiales, las profundidades de las clavadas se encuentran entre 30 y 60 metros, para la cual realizan bombeo permanente de agua.
FORMA DE VENTILACIÓN	En las pequeñas explotaciones subterráneas se utiliza ventilación artificial con ventiladores tipo búfalo.
SOSTENIMIENTO	En la explotación en superficie se evidencia desplazamiento de material, fracturamientos y extracción en las bases de los taludes que pueden ocasionar desplomes. En las clavadas se realiza sostenimiento en cuadros y en las guías se instalan puertas alemanas y en sectores de roca estable se deja el sostenimiento natural. Se observó sostenimiento vencido por lo que se recomienda hacer seguimiento y refuerzos de sostenimiento en las zonas de fragilidad. Se observó que se realizan nuevas excavaciones en áreas que ya han sido trabajadas por antiguos mineros, lo cual puede afectar la estabilidad de la roca encajante y ocasionar accidentes.
FORMA DE ARRANQUE	En la explotación en superficie se utilizan herramientas manuales, picos palas, martillos. Se utilizan herramientas manuales, también martillos perforadores eléctricos y neumáticos. fracturamiento de roca con insumos y herramientas artesanales.
CARGUE Y TRANSPORTE	En la explotación en superficie se utilizan baldes y carretillas manuales. En las labores en guía el cargue de material se realiza de manera manual y se transporta con carreta y baldes. En las clavadas El cargue se realiza de manera manual. El mineral se acumula en baldes y se transporta por medio de malacates artesanales mecánicos.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	En la explotación en superficie se observan surcos y carcavamientos y desprendimiento de material, no se observó manejo de aguas de escorrentía y de sedimentos. El material estéril se acumula en los alrededores de las pequeñas explotaciones.
No DE PERSONAS VINCULADAS	Asociación de mineros El Alacrán ASOMINAL. Se reportó que en cada trabajo activo participan entre 3-5 personas.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	Promedio de 2 ton/día. Producción de oro 4 gr/ton. Promedio reportado por mina activa.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Molinos continuos, molinos de bolas, Plantas de amalgamación.

## 5.3. ANÁLISIS MINERO

En las minas visitadas del municipio de Puerto Libertador se identificaron mineralizaciones de oro de tipo lentes de sulfuro masivo estrato ligados y asociados a la presencia de pequeños stocks y cuerpos porfiríticos con alteración y mineralización diseminada. También hay mineralizaciones vetiformes encajadas en rocas ígneas andesíticas y en la secuencia vulcano-sedimentaria.

La mineralización identificada en el área ha servido para establecer que la mayor concentración de oro se encuentra relacionada con sulfuros de cobre y hierro: calcopirita, calcosina pirita, y con óxidos magnetita y hematita, encajadas en niveles estratificados con areniscas, tobas y rocas basálticas.

### Método de explotación:

Con el objetivo de buscar la tecnificación, la racionalidad y la productividad de las pequeñas explotaciones mineras se realiza un análisis teórico de datos puntuales de las vetas, en el que, a partir de la proyección inferida de un punto de rumbo y buzamiento, se examinan métodos de explotación que podrían adaptarse a las explotaciones artesanales.

Las características geológicas de cada veta son las principales condiciones que determinan la elección del método de explotación, debido a que se debe estudiar de manera detallada la forma del yacimiento, el tipo

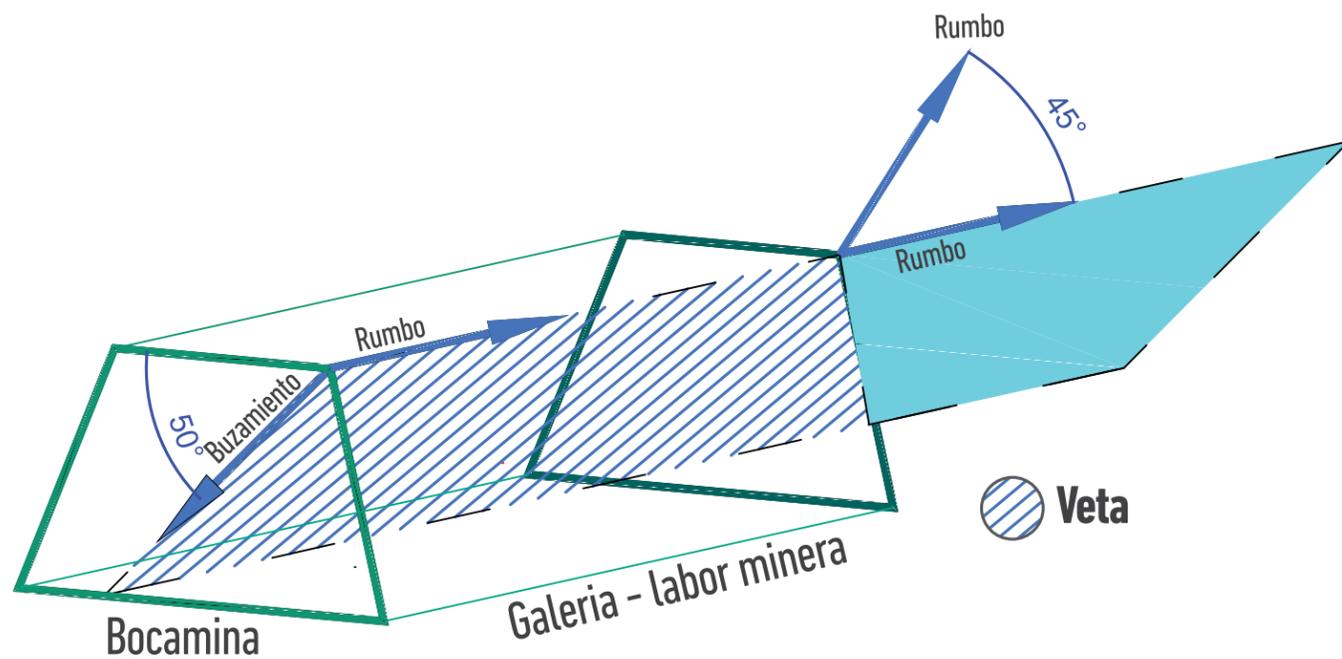
de depósito, la estabilidad de las rocas, el rumbo, buzamiento de la veta, resistencia de la roca de caja y de la veta, así como el grosor. Debido a que no se cuenta con información detallada de las mineralizaciones, se tomaron datos puntuales y disponibles de la información levantada por los geólogos en campo.

Con el propósito de identificar posibles métodos de explotación se realizó la proyección inferida de un punto de muestra de la veta y se dedujo una longitud en rumbo y en buzamiento. Esto debido a que no se cuenta con información exhaustiva de exploración, como la relativa a perforaciones, para determinar la continuidad de la veta, la estructura y la geometría de la mineralización.

Con estos datos se establece si la inclinación del buzamiento es vertical u horizontal y si las características de la roca de caja permiten conjeturar si son débiles o fuertes, para relacionar posibles métodos de explotación con base en métodos cualitativos, como el sistema de Boschkov y Wright (1973).

En la siguiente figura se esquematiza la proyección de un punto de una veta en rumbo y buzamiento, como un ejemplo para visualizar las proyecciones que se pretenden esquematizar de métodos de explotación, con base en los datos puntuales con que se cuenta.

Figura 5.16. Esquema de la proyección inferida de un punto de una veta en rumbo y buzamiento. Fuente: autores.



En las minas visitadas se realizó este ejercicio para luego proceder a analizar los posibles métodos de explotación que podrían ajustarse a estas proyecciones inferidas.

### 5.3.1. PROYECCIONES INFERIDAS PARA LAS PEQUEÑAS EXPLOTACIONES MINERAS VISITADAS

En las pequeñas explotaciones y minas artesanales muestreadas se identificaron vetas con direcciones NW y NE y buzamientos entre 40° y 70°. En el capítulo geológico se pueden ver las proyecciones de la vetas. (figura 5.17).

Figura 5.17. Rumbo y buzamiento de un punto de veta de MAPE visitadas en el municipio de Puerto Libertador. Fuente: autores.

MINA	MUNICIPIO	RUMBO	BUZAMIENTO	ALTITUD (m)	ROCA DE CAJA	MINERALIZACIÓN
PIRITA	SAN MATIAS	N35W	60-65°NE	118	Roca mafica con alteración hidrotermal con silicificación y cloritización fuerte	Geometría de rosario a lo largo del rumbo con espesores máximos observados de 80 cm
RAA	RA-WILLIAN	N70E	60° SE	235	Roca meteorizada con alteración hidrotermal	Veta de ancho observado metro cincuenta (1.5 m)
EL ALACRÁN	EL ALACRÁN	N20W N30E	60NE 70NW	187	Brecha tectónica con fragmentos angulares de rocas sin diferenciar	La mineralización contiene sulfuros, veta de colores blanco lechoso con parches de oxidación y piritización. Mineralización incipiente a moderada de pirita
EL ALACRÁN	El Alacrán parte alta explotación a cielo abierto	N38W	40-45° SE	187	Rocas volcano-sedimentarias meteorizadas	Lentes de sulfuros estrato-ligados. Vetas delgadas y masivo dependiendo de las condiciones en que aparece la veta se define la explotación
BUENOS AIRES	Buenos Aires - San Pedro	Sin definir. Se observaron mineralizaciones en superficie asociada a estructuras N20°W y N70W	Sin definir buzamientos entre 40° y 50° al SW	327	Roca caja fresca de composición andesítica	Explotan afloramientos locales en superficie de Magnetita y pirrotina masivas en una roca caja fresca. Mineralización en masas irregulares
TEHERAN	SAN MATIAS	N20W	40-60 SW	169	Diorita porfirítica infra-yaciendo depósitos volcanosedimentarios	Mineralización con calcopirita en venillas y diseminada. Venas muy estrechas.

## 5.4. CONSIDERACIONES MINERAS

### 5.4.1. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

Para mejorar la producción en las pequeñas explotaciones se requiere contar con un planeamiento minero que parta de la caracterización geológica del yacimiento mineral, de establecer su tamaño, forma, grado de mineralización, para luego definir el método de explotación con base en sus características geométricas, la orientación del yacimiento, el rumbo, buzamiento, resistencia de la roca y los factores económicos que influyen sobre la ejecución del proyecto minero.

Actualmente las pequeñas explotaciones y minas artesanales siguen la mineralización por medio de guías y tambores o clavadas, y en labores antiguas ya intervenidas se desarrollan cruzadas para encontrar la veta más amplia.

Para seleccionar un método de explotación hay diversos sistemas, tanto cuantitativos como cualitativos. Entre los métodos cualitativos se encuentra el sistema de Boschkov y Wright (1973), sistema que se basa en la potencia e inclinación del cuerpo mineralizado y la resistencia del macizo rocoso, como se observa en la siguiente tabla:

Figura 5.18. Métodos de explotación según el tipo de mineralización, buzamiento y resistencia de la mena y roca encajante. Fuente: Darling Peter; Society for Mining, Metallurgy and Exploration (U.S) (2011). Mining engineering-Handbooks,manuals.

TIPO DE MINERALIZACIÓN	BUZAMIENTO	RESISTENCIA DE LA MENA MINERALIZADA	RESISTENCIA DE LA ROCA DE CAJA	MÉTODO DE MINERÍA COMÚNMENTE APLICADO			
Capas delgadas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales. Cámaras y pilares. Tajo largo			
		Débil o fuerte	Débil	Tajo largo			
Capas gruesas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales Cámaras y pilares			
		Débil o fuerte	Débil	Cavidades en subniveles			
Capas muy gruesas	N.A.	N.A.	N.A.	Igual que masivos			
Venas muy delgadas	Inclinado	Débil o fuerte	Débil o fuerte	Extracción selectiva (resuing)			
Venas delgadas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales Cámaras y pilares			
				Cámaras abiertas Corte y relleno			
	Inclinado	Fuerte	Fuerte	Espacios con sostenimiento cuadrado			
				Débil	Fuerte	Espacios con sostenimiento en cuadros	
Venas gruesas	Inclinado / Inclinado	Fuerte	Fuerte	Tajos descendentes Hundimiento (Underground glory hole) Shrinkage stopes (excavaciones ascendentes) Subniveles Corte y relleno Combinación de métodos			
				Inclinado	Fuerte	Débil	Corte y relleno
				N.A.	Fuerte	Fuerte	Hundimiento controlado Subniveles Corte y relleno Combinación de métodos
				N.A.	Débil	Fuerte o débil	Subniveles Bloques -camaras Cámaras con sostenimiento en cuadros Combinación de métodos
				horizontal	N.A.	N.A.	Igual que masivos

Tomando como base las anteriores definiciones geológicas se realiza un análisis preliminar de los posibles métodos de explotación que podrían implementarse en las zonas mineras visitadas que presentan venas delgadas.

Figura 5.19. Análisis inferido de posibles métodos de explotación que se podrían implementar en las pequeñas explotaciones visitadas de Puerto Libertador. Fuente: autores.

TIPO DE MINERALIZACIÓN	BUZAMIENTO	RESISTENCIA DE LA MENA MINERALIZADA	RESISTENCIA DE LA ROCA DE CAJA	MÉTODO DE MINERÍA COMÚNMENTE APLICADO	MUNICIPIO DE PUERTO LIBERTADOR
Capas gruesas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales Cámaras y pilares	De las minas visitadas se identifica que los puntos muestreados presentan buzamientos inclinados y rocas de caja resistentes a moderadamente resistentes.  Vetas delgadas menores a 3m de potencia.
				Débil o fuerte	
Venas muy delgadas	Inclinado	Débil o fuerte	Débil o fuerte	Extracción selectiva (resuing)	
Venas delgadas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales Cámaras y pilares	
				Inclinado	
	Débil	Fuerte	Cámaras con sostenimiento cuadrado		
	Inclinado	Débil	Débil	Cámaras con sostenimiento en cuadros	

Basado en el Sistema de Boshkov y Wright. Métodos de explotación según el tipo de mineralización, buzamiento y resistencia de la mena y roca encajante. Darling, SME(2011). mining Engineerin Hanbook 2011.

En síntesis las mineralizaciones identificadas en el estudio presentaron en general características de venas delgadas y respaldos competentes por lo que se puede pensar en métodos de explotación como corte y relleno, cámaras y pilares, cámaras con sostenimiento en cuadros y subniveles.

También es posible pensar en métodos de explotación a cielo abierto como open pit para mina Teherán como para El Alacrán.

Open pit es un Método de explotación usado en minería a cielo abierto, en el cual se realiza un banqueo descendente, y se forma una pirámide circular hacia profundidad. Se utiliza en yacimientos masivos o de capas inclinadas. La profundidad de estas explotaciones suele ser grande, y en algunos casos se llega a superar los 300 m. (MME, 2015)

Las diferentes características de las minas estudiadas requieren que se realicen estudios específicos para conocer el comportamiento de las vetas y de las rocas encajantes. Por lo cual en los programas de trabajos y obras que se realicen en cada uno de los subcontratos y en los proyectos que se ejecuten, es importante elaborar un análisis geológico detallado y un análisis de alternativas de métodos de explotación donde

se identifiquen las ventajas y desventajas para así escoger el método de explotación que mas se acomode a las características del depósito minero, a las condiciones económicas de las personas que invierten en la explotación y que permita una buena recuperación del mineral tanto en la parte productiva como en la recuperación económica de la inversión, teniendo en cuenta además los aspectos ambientales de manera que se de un manejo y mitigación a las posibles afectaciones que se presenten en los recursos agua, suelo, flora, fauna. Esto es importante debido a que las explotaciones mineras deben procurar ser amigables con el medio ambiente tanto en las explotaciones en pequeña escala como en las de mayor escala.

## 5.4.2. SOSTENIMIENTO

En la mina Teherán la explotación se desarrolla a cielo abierto. Actualmente se está realizando un arranque de mineral de manera artesanal y manual en las bases y piso del área mineralizada. Este tipo de acciones genera que los taludes pierdan estabilidad debido a que las bases están siendo removidas con la explotación, factor que se va incrementando con la acción de las aguas de lluvias (escorrentía) que incrementan el arrastre de partículas, desestabilización de las laderas y posibles desplomes como los ya ocurridos anteriormente en la mina. Todo lo anterior es de tener en cuenta debido a que la seguridad del personal minero es prioritaria entonces las acciones correctivas que los líderes de los procesos mineros puedan adelantar para proponer el banqueo, terraceo o conformación de niveles de trabajo donde se tengan mayores controles para la seguridad del personal. Esta situación es similar a las presentadas en una pequeña explotación a cielo abierto en la mina El Alacrán-mi Tío y en la pequeña explotación minera Buenos Aires, donde el material laterizado y enriquecido se va desestabilizando por acción de las aguas lluvias y las excavaciones mineras.

En las minas subterráneas como Piritá se identificó que se maneja una aparente estabilidad de la roca de respaldos en los primeros niveles de explotación, aproximadamente hasta los 30 m de profundidad, debido a la fuerte silicificación de la roca. Esta situación ha permitido manejar el sostenimiento natural en cámaras que no superan 2m de altura. Sin embargo, es importante que se realice un estudio geo-estructural a medida que se vaya profundizando la explotación, así como la revisión permanente de la estabilidad de los respaldos, paredes y techo de la labor minera. El manejo del agua interna de mina es un factor que también se debe priorizar; el agua corriendo sin control por el tambor de acceso puede favorecer el debilitamiento de alguna estructura como también deteriorar las escaleras de madera por las cuales se ingresa y evacua la mina, a pesar de que se utiliza madera resistente, los controles diarios es necesario que se lleven a cabo. El bombeo permanente del agua de mina permite que se puedan ejecutar las labores mineras de lo contrario se limitan los trabajos en los niveles inferiores y de avance. Algunas acciones para manejar el agua son: identificar el punto nacimiento o ingreso del agua, analizar si se puede organizar un almacenamiento o depósito en los niveles superiores para controlar la caída de agua a los niveles inferiores. analizar si es posible impermeabilizar o desviar el punto de ingreso del agua. contar con plantas de energía auxiliares para emergencias y garantizar la continuidad del bombeo.

En la mina artesanal El Alacrán, las primeras capas de suelo se encuentran meteorizadas y presentan alta humedad por las lluvias constantes en la región. En el Alacrán se han desarrollado por más de 30 años, con alrededor de 100 labores, esto conlleva a que los respaldos no sean consistentes, además de que la zona esta sobre-explotada debido a que las bocaminas y labores de avance y desarrollo subterráneas se encuentren cercanas unas con otras, que se comuniquen o que se superpongan entre sí. Esto es una situación que se debe analizar de manera específica en el terreno por equipos de profesionales como ingenieros de minas, geólogos, topógrafos. Además, al interior de las excavaciones, las condiciones de humedad y las presiones naturales de las rocas hace que las puertas de madera instaladas tipo cuadros, medias puertas, palancas, puertas alemanas se deterioren. Otro aspecto es la identificación de los puntos que fracturamiento de roca o de altas presiones para identificar las medidas de control necesarias a tomar, entre las que se encuentran los cambios de puertas de madera, aumentar la densidad o disposición de puertas entre 0.5m y 1.0 m especialmente en las zonas de inestabilidad o mayor presión y realizar estudios específicos geo-estructurales para la implementación de los planes de sostenimiento donde se identifique la viabilidad, estabilidad y medidas preventivas y correctivas en lo referente a sostenimiento para las explotaciones de la mina El Alacrán. .

Se considera que es importante para el minero tener en cuenta los siguientes aspectos referentes al sostenimiento:

- El sostenimiento de las obras subterráneas se hace necesario para controlar la estabilidad de las excavaciones y para mejorar la seguridad del personal que trabaja o circula por ellas.
- El buen sostenimiento es básico para garantizar el tránsito de personal, equipos y el desarrollo, preparación y operación de la explotación.
- Un buen sostenimiento permite el desarrollo y operación segura de la explotación.
- Cuando el sostenimiento es natural se debe realizar inspecciones diarias del comportamiento de la roca para identificar zonas de debilidad o fractura donde es necesario instalar el reforzamiento con sostenimiento artificial.
- Contar con un buen sostenimiento minero es básico para la seguridad del personal y de la operación minera.
- Según las condiciones del terreno y la fracturación de la roca se determina qué tipo de sostenimiento se utilizará para garantizar que se conserven las labores mineras. Por lo cual es necesario realizar estudios geotécnicos y de geología estructural para determinar las características físicas y de resistencia a la compresión, flexión y tensión de la roca.
- Dependiendo de las condiciones geotécnicas del terreno, se pueden emplear diversos medios de refuerzo de roca las cuales pueden ser: sostenimiento natural o artificial con puertas de madera, arcos de acero, pernos de anclaje.
- Las puertas de madera sirven para soportar las presiones de techo y paredes de la mina.
- Un taco de madera rolliza sirve para soportar presiones en los techos de las minas
- Después de las voladuras queda material suelto en el techo o paredes cuya remoción se realiza con posterioridad o se acumula aumentando la posibilidad de desplomes, accidentes y de obstrucción de los frentes de explotación, lo que hace necesario que se realice diariamente el proceso de desabombar el techo de material suelto.

### Características técnicas del sostenimiento:

- Ser resistente a las cargas y presiones.
- Ser estable. La fortificación debe conservar la forma que se le proyecta aún bajo la acción de las cargas.
- Ser duradera: su vida útil debe ser acorde con las labores de la explotación.
- Ocupar el menor espacio posible para permitir conservar la sección mínima de 3m<sup>2</sup>.
- Las dimensiones de las galerías serán construidas con áreas que permitan la libre circulación de personal, máquinas y herramientas, en condiciones normales las excavaciones mineras tendrán tres (3) metros cuadrados y una altura libre de uno metro ochenta (1.80) metros. (Decreto 1886 de 2015, Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas). Figura 15. Sostenimiento de puerta alemana.
- Se recomienda mantener limpios los frentes de avance y asegurados los frentes de las labores subterráneas.
- Supervisar y mantener en buenas condiciones las puertas de madera del sostenimiento de la mina.
- Generalmente el sostenimiento en las minas se realiza con puertas alemanas que se conforman con tres maderas resistentes que conforman un trapecio, las partes de la puerta son Capiz que se instala en la parte superior de la puerta soportada por dos palancas. El Capiz puede ser sencillo o de doble diente o patilla. También se utilizan tiples y cuñas para ajustar las puertas y forros de paredes.
- Los tiples son troncos de madera que se instalan perpendicularmente entre las puertas para evitar que se inclinen, para el ajuste en las palancas se realizan con cortes en boca de pescado. las cuñas son

troncos pequeños de madera que se utilizan para ajustar las puertas con la roca y el forro es la madera utilizada entre la puerta y la roca para evitar caída de roca.

Figura 5.20. Sostenimiento de puerta alemana. Sección mínima 3m². Altura mínima de 1.80m. Fuente: autores.



### 5.4.3. VENTILACIÓN

La ventilación de la mina es necesaria para garantizar una buena atmosfera minera para el personal, durante el desarrollo de las operaciones de arranque, voladuras, cargue y transporte.

Es importante recordar que en toda labor minera es necesario contar con una entrada y una salida independiente para lograr circuito de ventilación y como vía alterna de evacuación de personal. las labores de entrada y salida independientes preferentemente estarán ubicadas a una distancia de 50 metros entre una y otra.

En las minas subterráneas visitadas la mayor parte contaba con ventiladores soplantes tipo búfalo cuya operación es necesario que se monitoree debido a que las mangas o conductos del aire generalmente no son las adecuadas como tela de costal, tubos de pvc, también las mangueras se pueden encontrar deterioradas lo que hacen que se ocasionen pérdidas de caudal de aire, el cual puede resultar insuficiente para garantizar la buena atmosfera al interior de la mina. Por ello es importante contar con un termo anemómetro para medir la temperatura al interior de la mina y el caudal del aire que se encuentra circulando para identificar si hay que implementar acciones correctivas.

Es importante considerar el caudal de aire mínimo por trabajadores el cual será:

El volumen mínimo de aire que circule en las labores subterráneas, debe calcularse teniendo en cuenta el turno de mayor personal, la elevación de las labores sobre el nivel del mar, gases o vapores nocivos y gases explosivos, los volúmenes mínimos de caudal serán:

- Excavaciones mineras hasta 1500 metros sobre el nivel del mar: 3m³/min por cada trabajador.
- Excavaciones mineras con cotas superiores a los 1500 metros sobre el nivel del mar: 6m³/min por cada trabajador.

En las labores mineras se deben realizar monitoreo de medición de gases que se puedan presentar en las minas, para el cual se requiere contar con un multidetector de seis gases y con un tablero de registro de las mediciones diarias donde se registre la fecha y hora, frente de trabajo y las concentraciones de la medición de gases.

Es necesario llevar un registro en un libro de las mediciones realizadas. En caso de presentarse altas concentraciones de gases tóxicos o asfixiantes o explosivos se requiere evacuar el personal y ventilar las labores mineras o realizar correctivos a la ventilación hasta que se logre una atmosfera normal.

La temperatura y humedad influyen en la jornada laboral del personal por lo cual esta se puede controlar con la ventilación.

La temperatura efectiva es la combinación de la temperatura del ambiente, la humedad relativa y el movimiento del aire en la mina que genera la sensación de frío o calor en el personal al interior de la mina.

La temperatura efectiva en el frente de trabajo se calcula de la siguiente manera:

$$te = 0.7 th + 0.3 ts - V$$

donde: te= temperatura efectiva

th = temperatura húmeda en grados centígrados.

ts = temperatura seca en grados centígrados.

V = Velocidad de la corriente del aire m/s.

Los tiempos de permanencia del personal en los frentes de trabajo, según la temperatura efectiva son los siguientes:

#### Temperatura efectiva te (°C) vs Tiempo de permanencia (horas)

Figura 5.21. Cuadro de Temperatura efectiva Vs tiempo de permanencia. Fuente: autores.

TEMPERATURA EFECTIVA. TE (°C)	TIEMPO DE PERMANENCIA (HORAS)
28°C	Sin limitaciones
29°C	Seis (6) horas
30 °C	Cuatro (4) horas
32 °C	Cero (0) horas En aquellas partes de la mina donde se tenga una temperatura (te) superior a 31 °C, solamente podrán entrar cuadrillas de salvamento de la mina o minero



Fotografía 5.13. Termómetro anemómetro. Fuente: <https://mlstaticquic-a.akamaihd.net>.

El Termo anemómetro permite realizar mediciones rápidas y exactas de la velocidad del aire, así como para determinar el caudal de aire en pies cúbicos por minuto (CFM) y la temperatura del ambiente húmeda y seca.



Fotografía 5.14. Multidetector de gases. Fuente: <http://www.equilabser.com>.

Un multidetector de gases en un equipo que detecta la presencia de los gases contaminantes en la atmosfera minera cuando superan los valores límites permisibles para la exposición y seguridad del personal y de las labores. Ante la alta emanación de gase el equipo emite una señal óptica y acústica de alarma para que se tomen las medidas correctivas correspondientes.

### 5.4.4. MINERO-AMBIENTALES

Durante los recorridos de campo de las explotaciones mineras se identificó que los materiales estériles correspondientes en su mayoría a fragmentos de roca pequeños o tipo rajón son arrojados a las laderas contiguas a las explotaciones., lo cual va generando acumulaciones de esos materiales e impactos visuales, paisajísticos e impactos localizados sobre los puntos de disposición que afectan la cobertura vegetal, el suelo y posiblemente las fuentes de agua cercanas. Se recomienda que este tipo de actividad se le dé un manejo acorde con la sostenibilidad ambiental. Definiendo un sitio de disposición final al cual se le organicen terrazas o niveles de adecuación. En las áreas que ya se tiene la disposición de estériles se podrían adecuar trinchos para estabilización del material. Los sitios que se designen para disposición preferiblemente deben estar distantes de fuentes hídricas.

Las aguas de mina podrán ser reutilizadas en los sistemas de beneficio, y analizar para determinar si el vertimiento directo a las quebradas afecta las condiciones naturales de estas.

Figura 5.22. Situación actual de las minas artesanales en pequeña escala (MAPE). Fuente: autores.

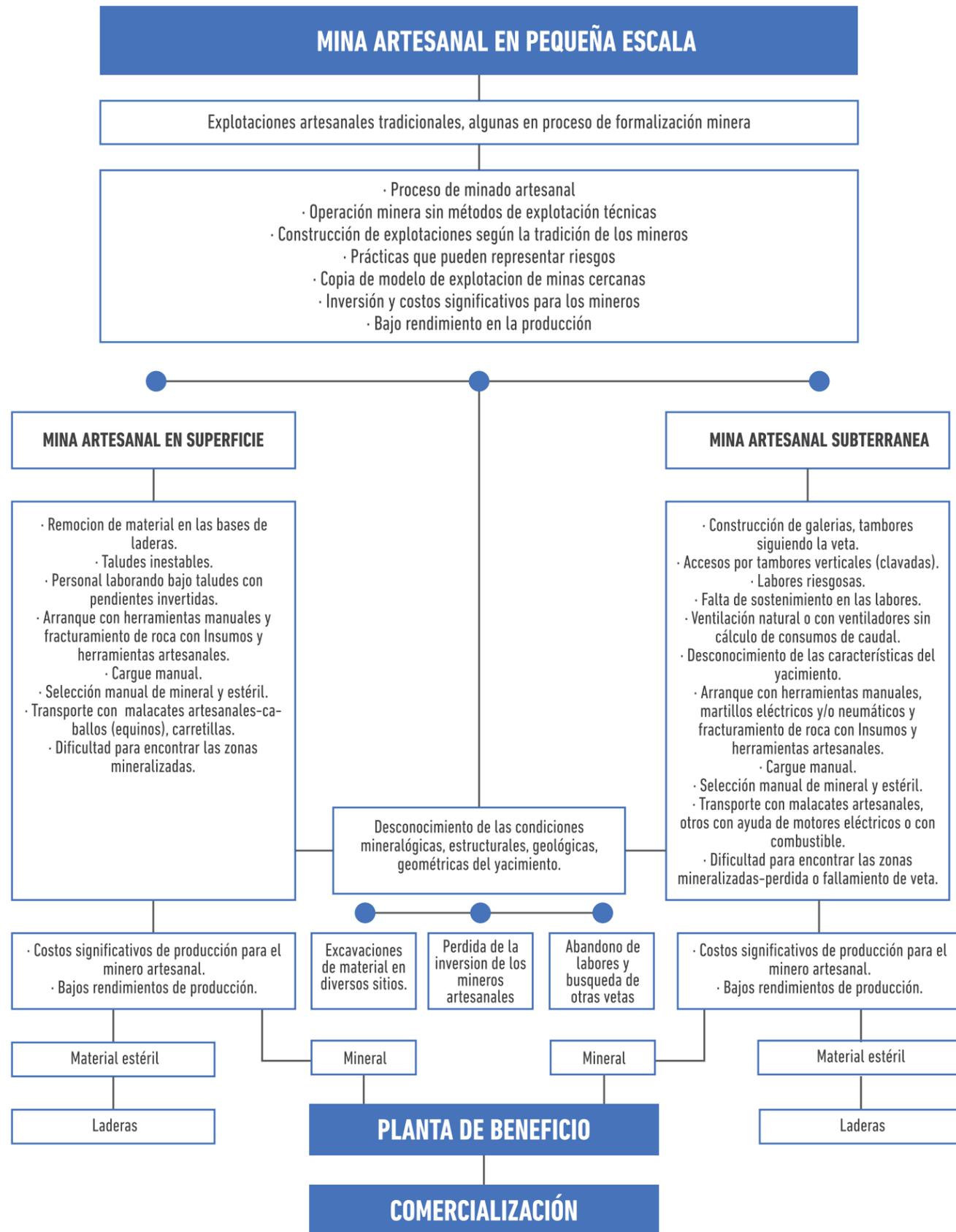
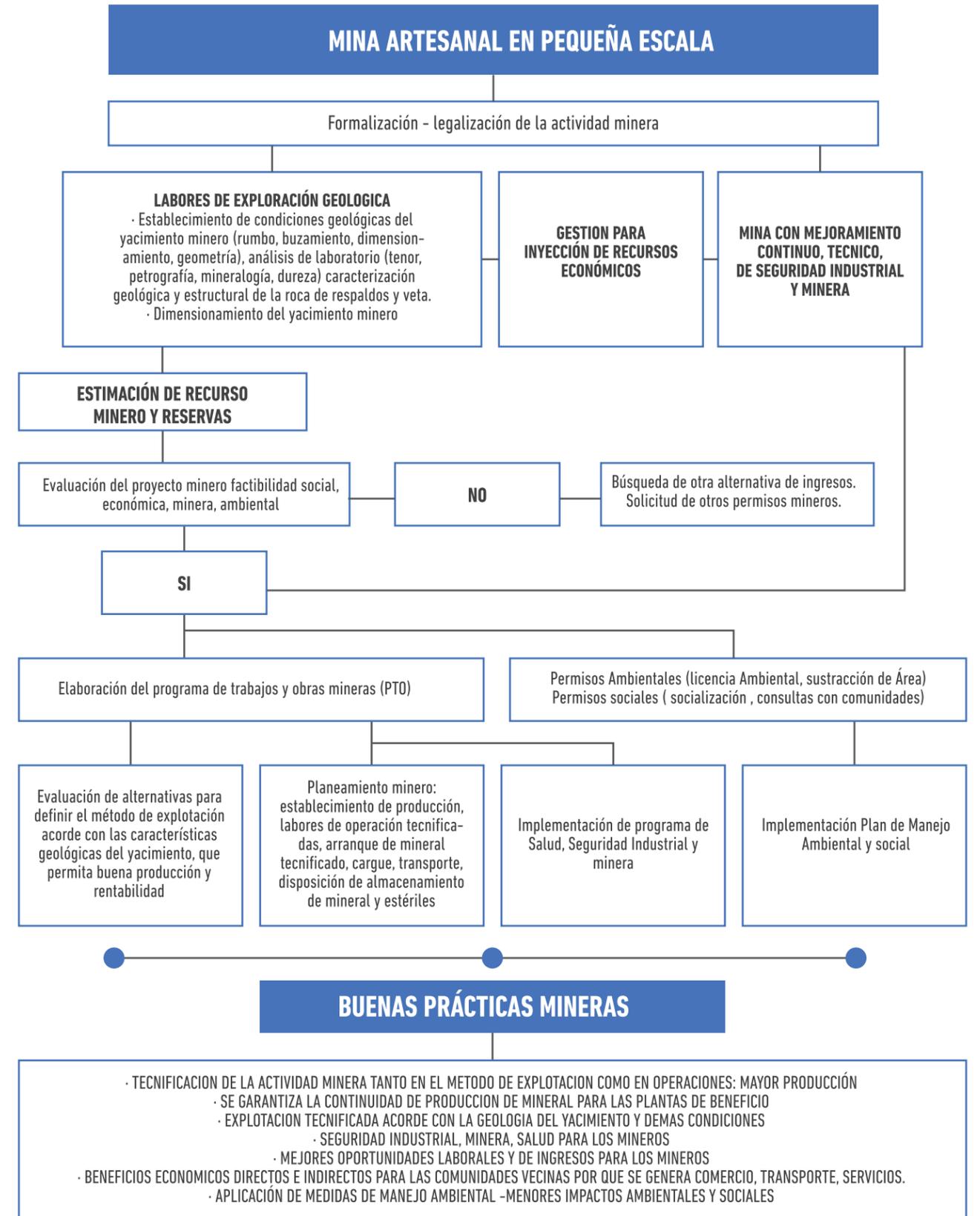


Figura 5.23. Propuesta de explotación para las minas artesanales en pequeña escala (MAPE). Fuente: autores.



## 5.5. CONCLUSIONES EN ASPECTOS MINEROS

- La actividad minera estudiada en el municipio de Puerto Libertados corresponde a minas artesanales en pequeña escala (MAPE), cuyas actividades a lo largo del tiempo han beneficiado a numerosas familias de este municipio; sin embargo, estas explotaciones son pequeñas, de poca profundidad y extensión, y las herramientas utilizadas son artesanales, manuales, elaboradas por ellos mismos, si bien ya se adquieren equipos un poco más tecnificados, a la medida de sus posibilidades.
- Los métodos de explotación identificados son explotación en superficie mediante arranque directo en el frente, guías, sobreguías y clavadas con guías en los niveles inferiores.
- Estas explotaciones artesanales se han desarrollado de manera empírica y con baja inversión, debido a la escasez de recursos, lo cual no ha permitido que se desarrolle una minería planificada y formalizada. Sin embargo, se han adelantado procesos de subcontratación de formalización minera, que en el futuro pueden dar buenos resultados en tecnificación y emprendimiento minero. En las figuras siguientes se presenta un esquema de las condiciones actuales de las pequeñas minas y la propuesta de mejoramiento.
- Es necesario darle importancia el sostenimiento de la explotación debido a que de este depende la seguridad del personal y la continuidad de las actividades en la mina. A medida que se avance en las labores es importante diseñar los planes de sostenimiento, en los que se realizará un análisis geológico y estructural de control de la mecánica de las rocas encajantes para así garantizar la seguridad de la labor y de los mineros.
- El cargue y transporte del mineral es la mayoría de las operaciones es manual o se hace con herramientas artesanales como malacates con cajones de madera y motores, o malacates manuales accionados con la fuerza del minero. Para el transporte también se utilizan equinos, en cuya montura se han acoplado cajones, así como carretillas manuales.
- En las minas de El Alacrán el ingreso a las operaciones mineras se hace por medio de tambores verticales o clavadas, por medio de malacates artesanales con cuerdas o guayas que se amarran a un gancho y un malacate con polea. Esta actividad representa un riesgo para los mineros, debido a que su vida depende de la resistencia de la cuerda, que no es de seguridad, como de la continuidad del suministro de energía para el funcionamiento del motor del malacate. Esto hace pensar que es necesario tomar medidas correctivas en lo referente al trabajo en alturas, tanto con la implementación del uso de arnés, cuerdas de seguridad, poleas y capacitaciones de trabajo seguro en alturas, para mejorar las condiciones de seguridad.
- La producción minera reportada en las operaciones visitadas no supera las cuatro toneladas día por explotación; los tenores reportados están entre 2 y 12 gr/t. Tras deducir los gastos operativos, las ganancias deben ser repartidas entre el propietario o cabeza de la explotación, los trabajadores y el beneficiadero. En los casos en que la explotación es familiar, se distribuyen las ganancias de manera equitativa. Conviene tener en cuenta que, a pesar de que algunas operaciones vienen siendo desarrolladas desde muchos años atrás, se continúan utilizando herramientas muy artesanales o diseñadas por los mismos mineros, por lo cual el nivel de tecnificación es bajo.
- Como medida básica, hay que continuar con los procesos de formalización y legalización de la actividad minera artesanal en el municipio de Puerto Libertador, para así determinar cuáles son los proyectos mineros sostenibles, en los que podrán iniciarse las etapas de exploración geológica, prefactibilidad, factibilidad, construcción y desarrollo, explotación, beneficio o transformación, de manera que se cuente con un planeamiento minero que implemente las buenas prácticas mineras, el desarrollo tecnológico y regional. El planeamiento minero se fundamenta en el tipo de yacimiento mineral, por lo cual es relevante realizar buenos estudios geológicos que determinen las características y el comportamiento del mineral, para establecer el método de minado y las metas de producción, con el objeto de garantizar un buen rendimiento de la producción, contar con material para la alimentación de la planta de beneficio y obtener la rentabilidad del proyecto, sin olvidar la seguridad e higiene en el trabajo.

# 6. ASPECTOS METALÚRGICOS

En este capítulo se muestran los diferentes aspectos metalúrgicos que se deben tener en cuenta, partiendo del conocimiento de las fases comprendidas en el proceso de beneficio y los principales equipos con los que se realizan las operaciones unitarias.

---

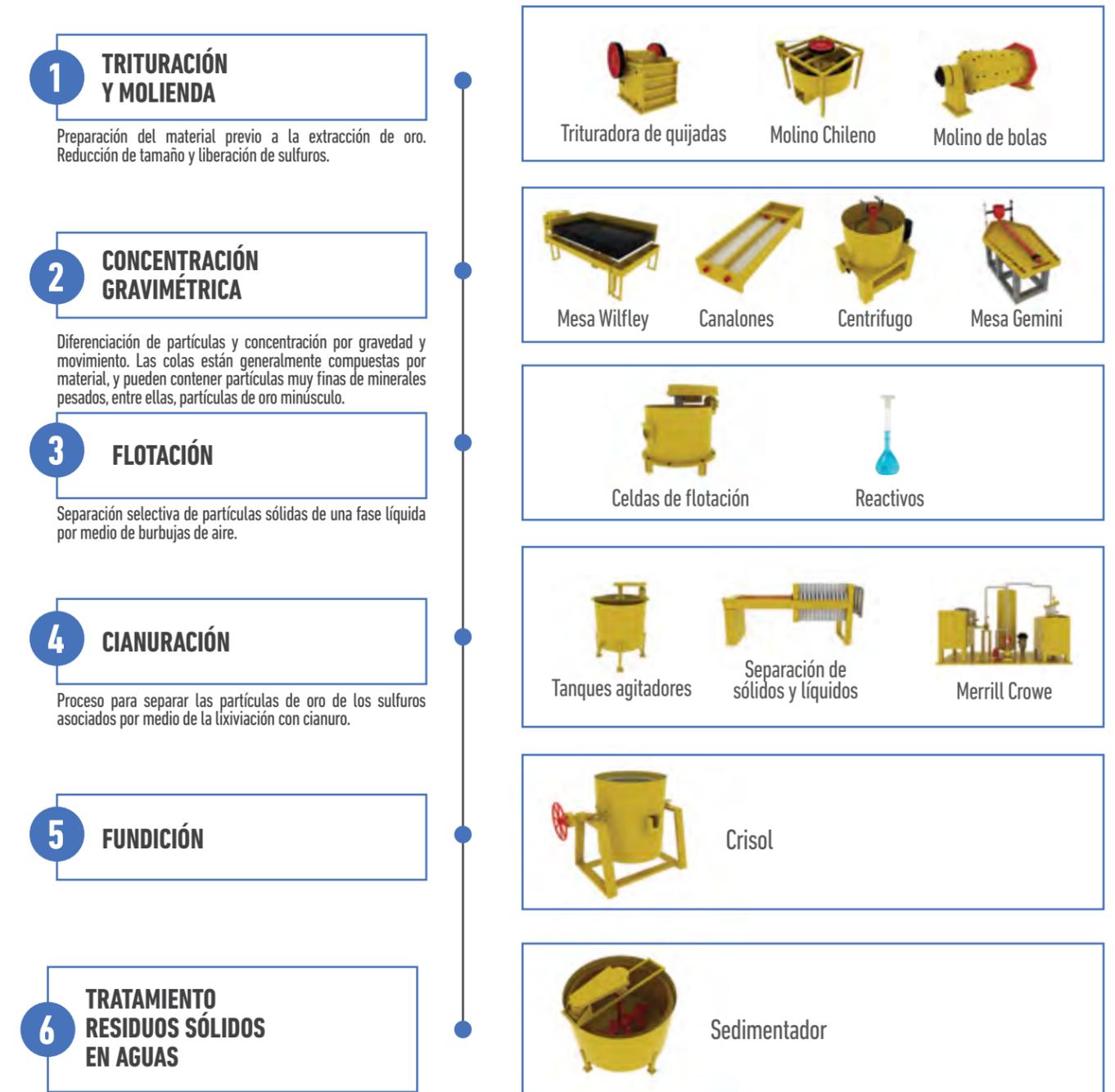
Herramientas utilizadas en fundición. Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano



# 6.1. FUNDAMENTOS TÉCNICOS DEL PROCESO DE BENEFICIO METALÚRGICO

## 6.1.1. BENEFICIO DE MINERALES EN PLANTA

Figura 6.1. Etapas de beneficio metalúrgico en planta. Fuente: Carvajal Herrera, 2008; Ministerio de Minas y Energía, 2015.



## 6.1.2. PROCESO DE CONMINUCIÓN (TRITURACIÓN Y MOLIENDA)

La conminución, o reducción de tamaño de un mineral, representa la primera etapa del beneficio, después de la extracción del mineral de la mina. La conminución es una etapa importante en el beneficio de minerales, pues contribuye a disminuir en un gran porcentaje los costos operativos y de capital de cualquier planta de procesamiento mineral. Dicho porcentaje oscila entre el 30 y el 50% del consumo total de energía de una planta, y puede llegar a un 70%, en el caso de minerales muy competentes (Napier, Morrel, Morrison y Kojovic, 1996). Los siguientes pueden ser los objetivos de la conminución:

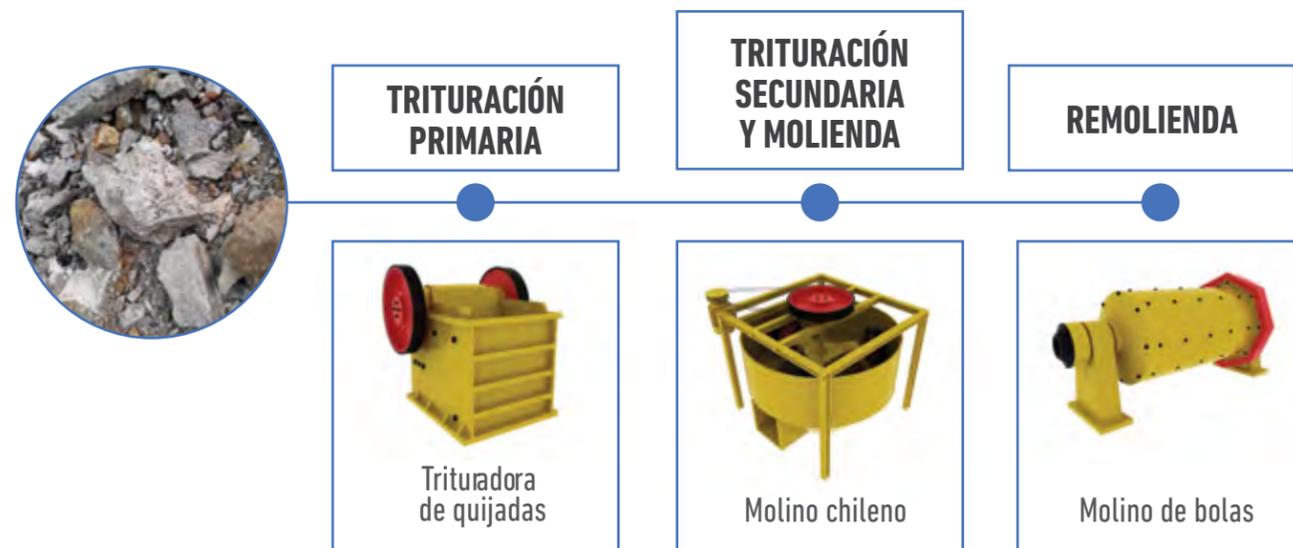
- Producir partículas de tamaño y forma adecuados para su utilización directa
- Liberar los minerales valiosos de los minerales de ganga, de modo que los primeros puedan ser concentrados
- Aumentar el área superficial disponible para reacción química

La reducción de tamaño del mineral extraído de la mina hasta lograr su adaptación a las operaciones de molienda y concentración es realizada en seco y por etapas, sobre todo debido al gran volumen de dichos fragmentos. La reducción en una sola etapa se traduce en mayores gastos energéticos y costos de operación, debido al mayor desgaste de los equipos.

La trituración es el conjunto de operaciones cuyo objeto es reducir grandes fragmentos de mineral a fragmentos menores, para facilitar las operaciones subsiguientes de transporte, molienda, concentración, etc.

El fin principal es entregar a la molienda un producto con tamaño de partícula entre 5 y 20 mm (Wills y Finch, 2016). El proceso de trituración generalmente se divide en trituración primaria (gruesa) y trituración secundaria (media y fina).

Figura 6.2. Diagrama de proceso de conminución (trituración y molienda). Fuente: autores.



### 6.1.2.1. TRITURACIÓN PRIMARIA (GRUESA)

Para la trituración gruesa se emplean las trituradoras de quijadas y giratorias (cónicas). Los tamaños de alimentación pueden variar, según el tamaño de la planta de beneficio. Así, en plantas que procesan más de 1.000 t/h pueden entregarse fragmentos con dimensiones de hasta 1.500 mm. La fragmentación de los minerales en la trituración primaria se da mediante la aplicación, fundamentalmente, de las fuerzas de compresión, clivaje y abrasión, aplicadas hasta obtener fragmentos cuya dimensión puede variar entre 300 y 100 mm, que son enviados a las siguientes etapas de trituración.

### Trituradora de quijadas

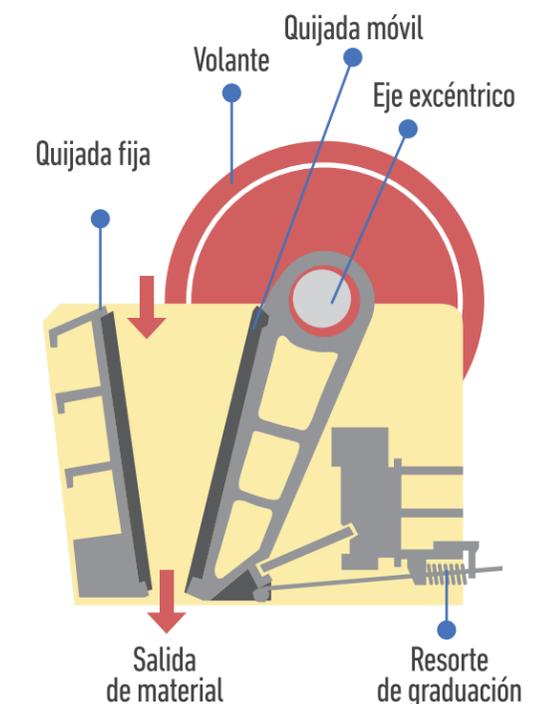
En la trituradora de quijadas, el mineral se fragmenta mediante compresión, en combinación con el clivaje, entre las superficies de las quijadas fija y móvil. La quijada móvil se aproxima (durante la marcha de trabajo) o se aleja (durante la marcha en vacío) de la quijada fija, al rotar el árbol excéntrico. Durante la marcha de trabajo se efectúa la trituración, y durante la marcha en vacío, la descarga por debajo del material triturado por la acción de la gravedad (López B., 2009).

Existen tres tipos de trituradoras de quijadas, que se clasifican de acuerdo al movimiento de la quijada móvil. En la trituradora de tipo Blake, la quijada móvil es pivotada en la parte superior y puede variar la abertura de salida; la trituradora tipo Dodge es pivotada en la parte inferior y puede variar la abertura de entrada; la trituradora de tipo universal es pivotada en el medio de la quijada móvil y pueden variar tanto las aberturas de entrada como de salida (Wills y Finch, 2016).

Fotografía 6.1. Modelo de trituradora de quijadas. Fuente: autores.



VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE OPERACIÓN
· Ángulo de pellizco	· Ancho de abertura de la boca
· Diámetro mineral inicial	· Longitud de la boca
· Diámetro mineral final	· Altura de la pared delantera
· Índice de Bond (kWh/t)	· Capacidad (t/h)
· Coeficiente de variación de peso	· Velocidad (rpm)
· Densidad mineral	· Velocidad crítica (rpm)
· Eficiencia	· Velocidad óptima (rpm)
· Múltiplo de variación de longitud de boca.	· Potencia requerida (HP)



### 6.1.2.2. TRITURACIÓN SECUNDARIA (FINA)

Después de la trituración gruesa, el material se somete a una trituración en las máquinas de trituración media y fina, en las cuales el proceso se realiza con el tamaño de salida de la trituración primaria hasta tamaños menores de 10 mm. En la trituración media y fina se utilizan principalmente trituradoras cónicas y de impacto.

## Trituradora de impacto

La trituradora de impacto (martillos) es una máquina que aprovecha la energía de un impacto o golpe para fragmentar el mineral. En general, estas máquinas proporcionan tasas mayores de reducción, si se comparan con las que proveen las trituradoras de mandíbulas, así como un buen factor de forma. Sin embargo, en materiales arcillosos su rendimiento disminuye.

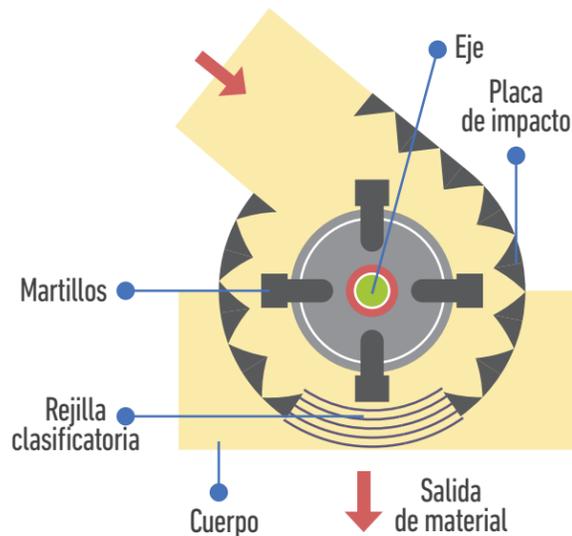
La entrada de la alimentación de la trituradora se sitúa en la parte superior, en un lateral con 45° respecto a la vertical; la salida del producto se encuentra en la parte inferior, y tiene una malla que clasifica el mineral que se encuentra en el tamaño adecuado. Las placas de choque, de acero al manganeso, se desgastan de forma desigual, por lo que se diseñan de forma simétrica para invertirlas y aprovecharlas mejor. Suelen ser dentadas para facilitar la fractura del mineral.

Fotografía 6.2. Modelo de trituradora de martillos. Fuente: autores.



Figura 6.4. Diagrama de funcionamiento de la trituradora de martillos y tamaños de trituradoras de martillos, potencia nominal y capacidades aproximadas (Denver, 1954). Fuente: autores.

MODELO	TAMAÑO DE ALIMENTACIÓN (mm)	TAMAÑO DE DESCARGA (mm)	CAPACIDAD (t/h)	POTENCIA DEL MOTOR (kw)	PESO (kg)
400 x 300	< 100	< 10	5-10	11	800
600 x 400	< 120	< 15	10-25	18.5	1500
800 x 600	< 120	< 15	20-35	55	3100
1000 x 800	< 200	< 13	20-40	115	7900
1000 x 1000	< 200	< 15	30-80	132	8650
1300 x 1200	< 250	< 19	80-200	240	13600



## Molino chileno

El molino chileno es la versión moderna del antiguo molino de arrastre (Simonin, 1867). Es una herramienta versátil, pues cumple la función de triturador secundario y molienda. Por ser de fácil limpieza, no retiene material dentro, como sucede con el molino de bolas; además, cumple funciones de concentrador de partículas gruesas y pesadas, como el oro.

El molino consiste esencialmente en discos pesados de acero que giran alrededor de un eje vertical y sobre un anillo con una superficie cóncava. Debido al peso de los discos, estos muelen el material cargado al mismo tiempo que crean corrientes que transportan el producto molido hacia las mallas de descarga. Este diseño (cóncavo y convexo) pre-

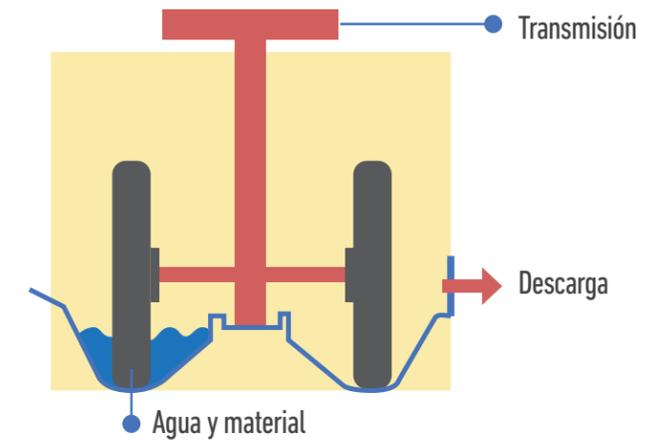
tende mantener el mineral siempre dentro del área de molienda, evitando así la dispersión o derrame. Esta operación contempla bajos costos de operación y mantenimiento, debido a la larga vida útil de sus componentes y la simplicidad de su funcionamiento (Velásquez, Veiga y Hall, 2010).

Fotografía 6.3. Modelo de un molino chileno. Fuente: autores.



**El molino chileno es una máquina versátil que permite triturar, moler y concentrar el oro grueso. Para el caso de las asociaciones es muy útil, debido a que cada minero puede trabajar su material sin que exista mezcla con materiales de diferentes minas.**

Figura 6.5. Diagrama de funcionamiento de un molino chileno. Fuente: autores.



MODELO	CAPACIDAD (t/h)	DIÁMETRO DEL MOLINO (m)	POTENCIA DEL MOTOR (HP)	PESO APROX. DE DISCOS DE MOLIENDA (kg)
1	12-30	1,5	6	500
2	30-60	1,8	12	1000
3	70-120	2,5	18	1750

### 6.1.2.3. MOLIENDA

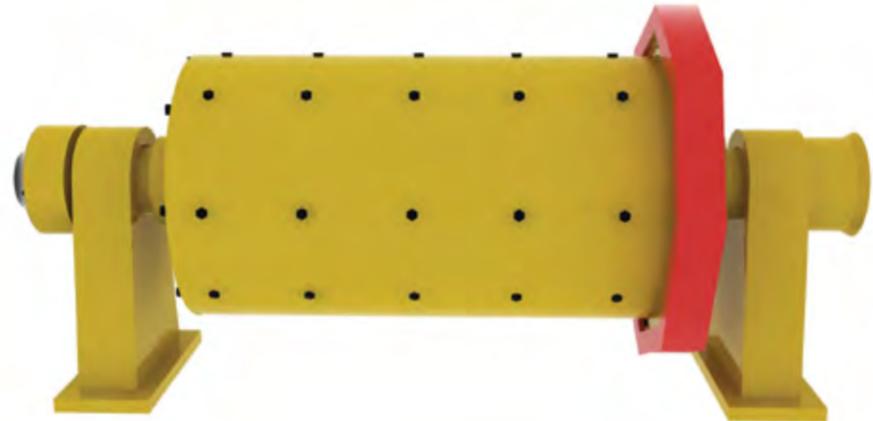
Es la operación final del proceso de conminución y consiste en reducir de tamaño partículas procedentes de la trituración media o fina (con fragmentos menores de 20 mm), hasta un tamaño que se encuentra en el rango de 28 a 200 mallas Tyler en la molienda gruesa, y menores de 325 mallas en la molienda fina. La molienda gruesa se conoce en la práctica como convencional.

En una planta de beneficio de minerales, la molienda es la operación que representa el mayor consumo energético y de elementos consumibles, como revestimientos y medios molidores por tonelada de mineral procesado. Por ese motivo el diseño de los

**Se requiere un molino de bolas remolador para reducir el tamaño de los rechazos de los procesos gravimétricos, con el objetivo de obtener una mejor recuperación en los procesos posteriores, como la flotación y cianuración.**

equipos y la definición de los parámetros de operación de la molienda son fundamentales para optimizar los costos y la recuperación de minerales valiosos.

Fotografía 6.4. Modelo de un molino de bolas. Fuente: autores.



## Objetivos de la operación

Con base en la etapa del proceso de beneficio de un mineral, la molienda puede tener dos objetivos (Austin y Concha, 1994): primero, liberar el mineral valioso del mineral de ganga a un tamaño lo más grueso posible; este es el caso de la concentración gravimétrica, en la cual se debe evitar la sobreproducción de finos (lamas). Segundo, obtener el tamaño de partícula apropiado para el proceso de concentración por flotación o para los procesos hidrometalúrgicos en los que se requiere que el mineral valioso esté expuesto en la superficie de las partículas, para que así puedan actuar sobre él los reactivos utilizados en los procesos antes mencionados.

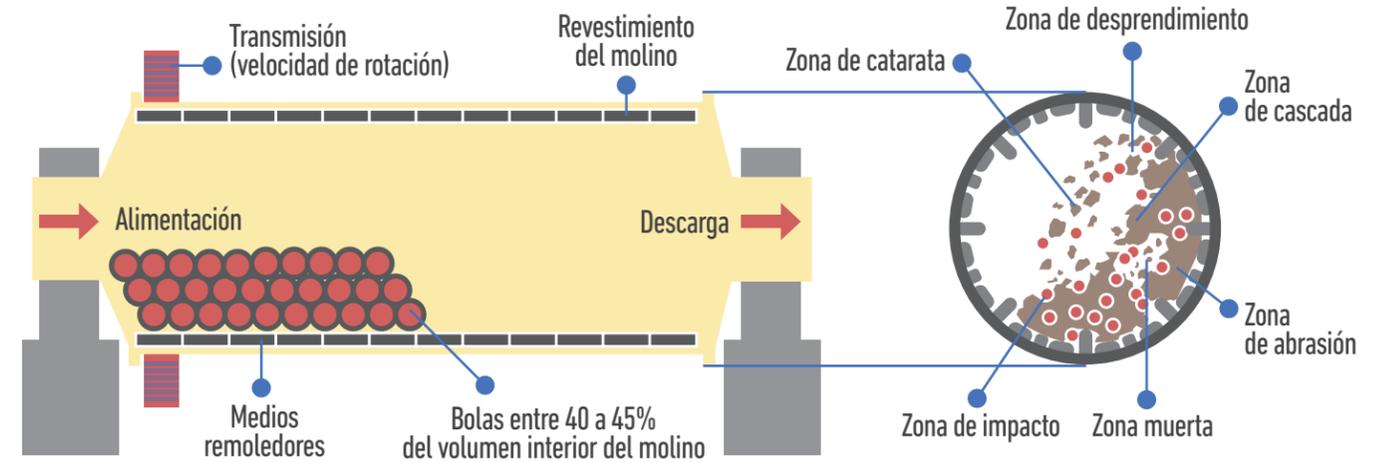
## Molino de bolas

Los molinos rotatorios se componen de un tambor cargado con una fracción de entre 25 y 45% de su volumen con medios moledores (bolas de acero, barras y cilindros de acero o guijarros, etc.). Durante la rotación del tambor, los medios moledores son arrastrados conjuntamente por la superficie de las paredes bajo la acción de la fuerza centrífuga y la fuerza de rotación a una altura determinada, y luego se deslizan o caen libremente y muelen el material por impacto y abrasión.

Las bolas (medios moledores) están completamente sueltas, móviles, y son de mayor peso y tamaño que las partículas de mineral que se molerá. Los medios moledores son arrastrados y levantados por la rotación del

VARIABLES DEL EQUIPO	VARIABLES DEL MINERAL	VARIABLES DE OPERACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Diámetro x longitud</li> <li>· Fracción de llenado</li> <li>· Porcentaje de la velocidad crítica</li> <li>· Tamaño máximo de cuerpos moledores</li> <li>· Porcentaje de sólidos</li> <li>· Capacidad nominal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Densidad del mineral</li> <li>· Diámetro máximo de la alimentación</li> <li>· Distribución granulométrica de la alimentación</li> <li>· Índice de Bond molienda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Flujo de alimentación</li> <li>· Densidad de pulpa</li> <li>· Consumo energético</li> <li>· D80 del producto</li> <li>· Distribución granulométrica del producto</li> </ul>

Figura 6.6. Diagrama de funcionamiento de un molino de bolas, tamaños estándar de molinos de bolas, potencia nominal y capacidades aproximadas. Fuente: 911 Metallurgist, 2018.



DIÁMETRO X LONGITUD (m)	ROTACIÓN APROXIMADA (rpm)	VOLUMEN DE CARGA DE BOLAS (t)	CAPACIDAD (t/h)	POTENCIA DEL MOTOR (kW)	PESO DEL MOLINO (t)
0,9 x 1,8	37	1,5	0,65 - 2	18,5	4,6
0,9 x 3	36	2,7	1,1 - 3,5	22	5,6
1,2 x 2,4	36	3	1,5 - 4,8	30	12
1,2 x 3	36	3,5	1,6 - 5	37	12,8
1,2 x 4,5	32	5	1,6 - 5,8	55	13,8
1,5 x 3	30	7,5	2 - 5	75	15,6
1,5 x 4,5	27	11	3 - 6	110	21
1,5 x 5,7	28	12	2,5 - 6	130	24,7
1,83 x 3	25	11	4 - 10	130	28
1,83 x 4,5	25	15	4,5 - 12	155	32
2,1 x 3	24	15	6,5 - 36	155	34
2,1 x 4,5	24	24	8 - 43	245	42

tambor, en un ángulo tal que la fuerza de gravedad (el propio peso de las bolas) supera a las fuerzas de cohesión y centrífuga de rotación del tambor. Estas, entonces, caen en movimiento de cascada y catarata fracturando así las partículas por impactos y fricciones continuos y repetidos. Esto se logra cuando el molino gira entre un 50 y un 75% de su velocidad crítica (Wills y Finch, 2016).

Ecuación de velocidad crítica fuente (Austin y Concha, 1994):

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_m - D_b}}$$

siendo  $V_c$  la velocidad crítica del molino en rpm,  $D_m$  el diámetro del molino en m y  $D_b$  el diámetro mayor de los cuerpos moledores en m.

**La velocidad crítica es la velocidad en la cual la fuerza centrífuga, por efecto de giro del molino hace que los cuerpos moledores se mantengan adheridos a la pared del molino y no caigan antes de dar un giro completo.**

### 6.1.3. CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA

#### Clasificación por cribado

El proceso de separación de sólidos a granel en clases según el tamaño, mediante el cernido a través de uno o varios tamices, se denomina clasificación granulométrica. La clasificación granulométrica en la criba se efectúa con un movimiento relativo del material y la superficie de trabajo (tamiz). Como resultado, se obtienen dos productos: partículas que pasan a través del tamiz (corriente B, llamada de bajo tamaño) y partículas que quedan en la parte superior del tamiz (corriente K, llamada de rechazo).

La función de la criba es dividir la corriente de alimentación en fracciones por tamaño, independientemente de su composición química o mineralógica. Las operaciones de cribado a seco generalmente están asociadas a los equipos de trituración, siendo estas las responsables del control del tamaño del producto final y del porcentaje de recirculación de los circuitos de trituración (Austin y Concha, 1994).

#### Variables que afectan la operación

La eficiencia del cribado o la probabilidad de que una partícula determinada de la alimentación vaya al rechazo R o al bajo tamaño B depende de la posibilidad que tenga de pasar a través de la abertura del tamiz.

Las partículas sobre la superficie de trabajo se obstaculizan unas a otras, y por ello puede ocurrir que algunas no lleguen a descender hasta la superficie. La posibilidad de que una partícula pase a través de una abertura, una vez llegue a la superficie, depende de tres factores:

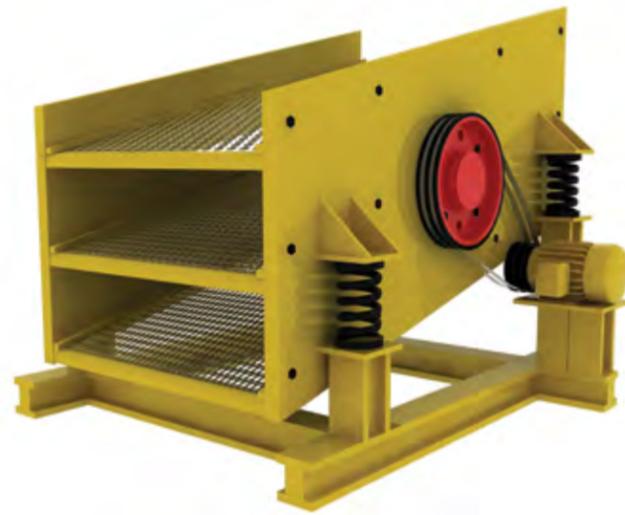
1. De las dimensiones de las partículas y del orificio del tamiz
2. De la forma de alimentación y de la posición de llegada a la superficie
3. De la inclinación de la superficie

### 6.1.4. CLASIFICACIÓN HIDRÁULICA

La operación de clasificación se caracteriza por el uso de agua adicional a la de la pulpa de alimentación, introducida de manera que la dirección de su flujo se oponga a la dirección de las partículas que se están realimentando.

En la minería de oro se suelen emplear genéricamente dos tipos de clasificadores hidráulicos: los de corriente horizontal accionados mecánicamente, y los hidrociclones.

Fotografía 6.5. Modelo de un criba. Fuente: autores.



**Las cribas son útiles principalmente durante las etapas de trituración, en tamaño inferiores a 1/16", pierden su eficiencia debido al taponamiento.**

Fotografía 6.6. Modelo de un hidrociclón. Fuente: autores.



### Hidrociclón

El hidrociclón es un equipo que se emplea, entre otras cosas, para clasificar partículas de tamaños entre 300 y 5 micrones (Wills y Finch, 2016).

La palabra hidrociclón está compuesta por el prefijo hidro-, que se refiere a la operación por vía húmeda (generalmente agua), y ciclón, que alude a la formación interna de un vórtice hidráulico (cuando se opera con agua) o neumático (cuando se opera con aire).

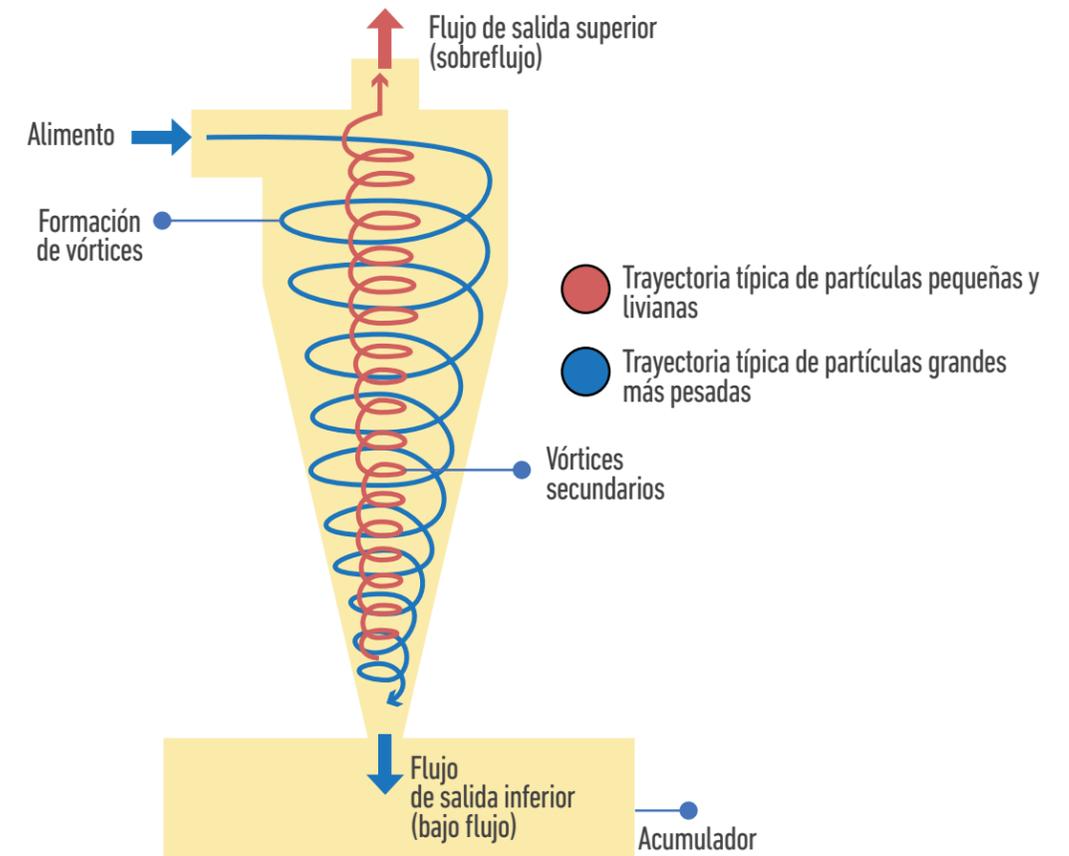
Aunque el hidrociclón es un equipo bastante simple en su forma, su funcionamiento es muy complejo.

Partamos del hecho de que la pulpa entra con una alta velocidad tangencial, que crea un vórtice. Las partículas, debido a este movimiento circular, se ven sometidas a dos fuerzas: una es la fuerza centrífuga, que lanza las partículas hacia las paredes del hidrociclón, y que es producto del movimiento curvilíneo; la otra fuerza es la centrípeta, dirigida, como su nombre lo indica, al centro del equipo. Esta fuerza es el resultado de un movimiento radial originado por un semivacío que se produce en el centro del hidrociclón.

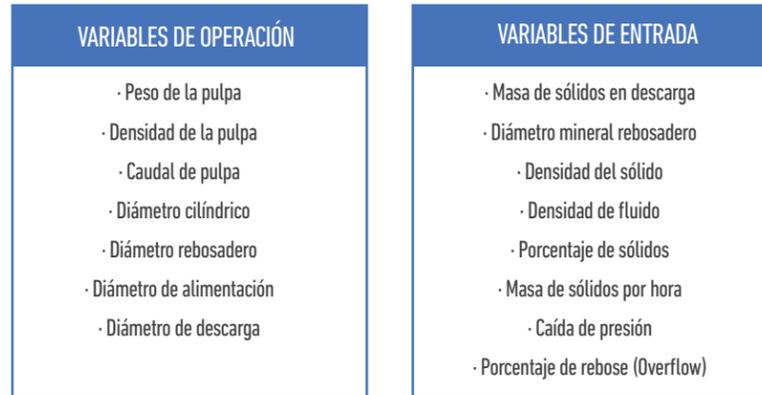
La diferencia de presión entre el vórtice y su centro origina una fuerza que trata de llenar el vacío. Ahora, si al vórtice formado por la pulpa se le introduce un tubo en la parte superior (buscador de vórtice), por este comienza a ascender dicha pulpa y a evacuar el hidrociclón. Por lo tanto, queda un equipo con una entrada tangencial y dos salidas: una superior, que se denomina rebalse, y otra inferior, que se denomina descarga.

Entonces, como el buscador del vórtice está ubicado en el centro del hidrociclón, por él va a evacuarse el material fino que sale por el rebalse, mientras que por la descarga saldrán las partículas más gruesas de la distribución granulométrica que ingresó al equipo y que generalmente son retornadas al equipo de molienda.

Figura 6.7. Diagrama de funcionamiento de un hidrociclón, tamaños de hidrociclones, presiones y capacidades aproximadas. Fuente: Denver, 1954.



PULGADAS	DIÁMETRO (mm)	ALTURA (mm)	PESO (Kg)	VOLUMEN (m³)	CAUDAL (m³/h)	PRESIÓN MÁX. (Kg/cm²)
2"	8"	792	20	0.063	11-17	8
3"	8"	910	26	0.133	18-34	8
4"	16"	1630	105	1.100	52-82	8
6"	20"	2195	230	1.350	98-160	8

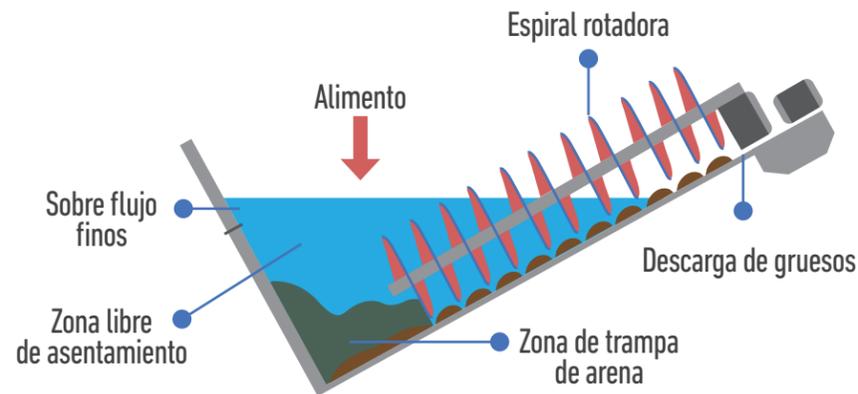


### Clasificador de espiral

En este tipo de clasificadores hidráulicos, las partículas de mineral con baja velocidad de sedimentación son arrastradas por el fluido y descargadas por rebalse; las partículas de mineral con velocidad de sedimentación alta se depositan en el fondo del equipo y son transportadas a la parte superior por una espiral (Wills y Finch, 2016).

Generalmente, los clasificadores en espiral son utilizados para cerrar los circuitos de molienda. Estos tienen la capacidad de absorber con relativa facilidad perturbaciones en el circuito, como variación del flujo o de la distribución de tamaño de partícula de la alimentación. Las principales variables que influyen en la eficiencia de la clasificación y el tamaño de corte son el nivel de pulpa en la zona de sedimentación, la velocidad de la espiral, el porcentaje de sólidos de la pulpa, el flujo y la distribución de tamaño de partícula de la alimentación.

Figura 6.8. Diagrama de funcionamiento de un clasificador de espiral. Fuente: autores.



## 6.1.5. CONCENTRACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR GRAVIMETRÍA

El objetivo principal de la concentración es enriquecer el mineral valioso eliminando los minerales de ganga y minimizando, en lo posible, las pérdidas de mineral.

El concepto de tenor es importante en el desarrollo de los objetivos que se pretenden alcanzar en la concentración de minerales. Podemos definir el tenor de un mineral como la relación que existe entre la

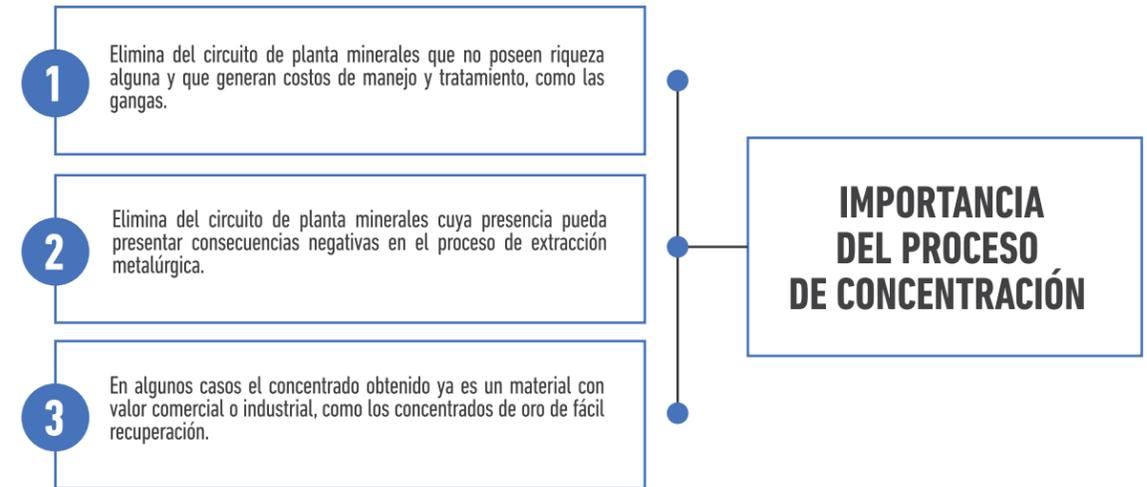
$$\text{TENOR} = \frac{\text{CANTIDAD DE MINERAL ÚTIL}}{\text{CANTIDAD DE MINERALES EXTRAÍDOS}}$$

cantidad másica o volumétrica de mineral de interés o valioso (oro), respecto a la cantidad másica o volumétrica en la mena. Por tanto, el tenor se puede expresar en gramos de mineral útil por tonelada de mineral total (g/t, g/m³).

Ahora, el objetivo de la concentración es elevar el tenor de una especie mineralógica de un metal u otro material en el concentrador, partiendo del tenor de alimentación.

En el caso ideal, el tenor del material útil, en las colas, debe ser nulo o cercano a cero. Como en todos los procesos no hay escenarios perfectos, este debe minimizarse en la medida de lo posible.

Figura 6.9. Importancia del proceso de concentración. Fuente: autores.



### 6.1.5.1. CONCENTRACIÓN GRAVITACIONAL O GRAVIMÉTRICA

La concentración gravimétrica puede definirse como la separación de dos o más especies de minerales con diferente peso específico (diferente densidad), causada por el movimiento relativo, bien sea en un medio acuoso o de aire, debido a la respuesta de los sólidos a las fuerzas gravitacionales, centrífugas, de arrastre y empuje (Da Luz, Sampaio y França, 2010).

Para que exista una buena separación debe tenerse en cuenta que no hay que alimentar las máquinas de concentración con distribuciones granulométricas muy amplias, es decir, en las que haya desde partículas muy finas a partículas muy gruesas.

**Para una separación gravimétrica efectiva debe existir una diferencia entre los valores de la densidad del mineral y la ganga. Calculando el criterio de concentración se tendrá una idea de la viabilidad de la operación.**

VALOR DE CC	SEPARACIÓN	TAMAÑO (mm)
> 2,5	Fácil	Hasta 0,075
1,75 - 2,50	Posible	Hasta 0,150
1,50 - 1,75	Difícil	Hasta 1,7
1,25 - 1,50	Muy difícil	
< 1,25	No posible	

$$CC = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f}$$

$D_h$ : Densidad del mineral pesado  
 $D_f$ : Densidad del medio fluido  
 $D_l$ : Densidad del mineral liviano  
 CC: Criterio de concentración

## Canalones

Los canalones son medios concentradores sencillos que constan de canales rectangulares ligeramente inclinados, de fondo plano, cubiertos por bayetas (láminas de tejidos que retienen las partículas pesadas), o canales trasversales denominados rifles.

Fotografía 6.7. Modelo de canalón. Fuente: autores.



Por estos canales pasa una corriente con un flujo de pulpa (25-30% sólidos) descendente. Las partículas de minerales más gruesas son atrapadas en el fondo de la bayeta o entre los rifles, y las partículas más finas siguen su curso descendente sin ser recolectadas por el canalón; posteriormente el material retenido es recolectado en tanques para su tratamiento.

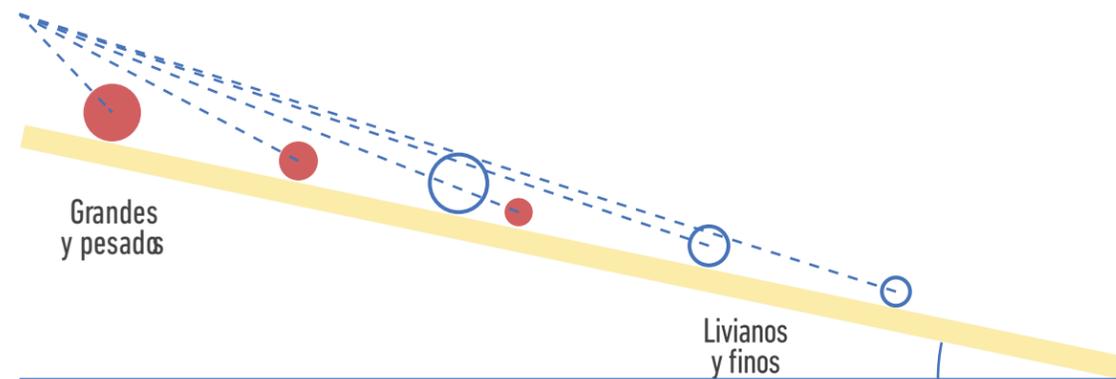
Para este tipo de minería estos canalones son generalmente construidos con concreto, aunque también se encuentran fabricados de madera, aceros convencionales o aceros inoxidable.

Las partículas en el fondo de la película de agua se ven afectadas por los siguientes factores (Da Luz, Sampaio y França, 2010):

- Pendiente del canalón
- Espesor de la película de agua (caudal)
- Los coeficientes de fricción entre las partículas y la superficie
- La gravedad específica de las partículas
- La forma de las partículas
- La rugosidad de la cubierta

## Variables de diseño de los canalones

Figura 6.10. Diagrama de principio funcionamiento de los canalones. Fuente: autores.



**Ancho.** Es una de las dos variables más importantes. Existen dos problemas en la escogencia del ancho ideal. En el primero, es deseable tener un ancho angosto para disponer de películas de fluido profundas y permitir la evacuación de partículas grandes, pero genera la pérdida de oro fino. La segunda es que un ancho mayor genera películas poco profundas, lo cual mejora la recuperación del oro, pero la capacidad de arrastre es baja.

Esto indica que es necesario realizar una clasificación previa al proceso y que los anchos más comunes y efectivos son de 42" a 40".

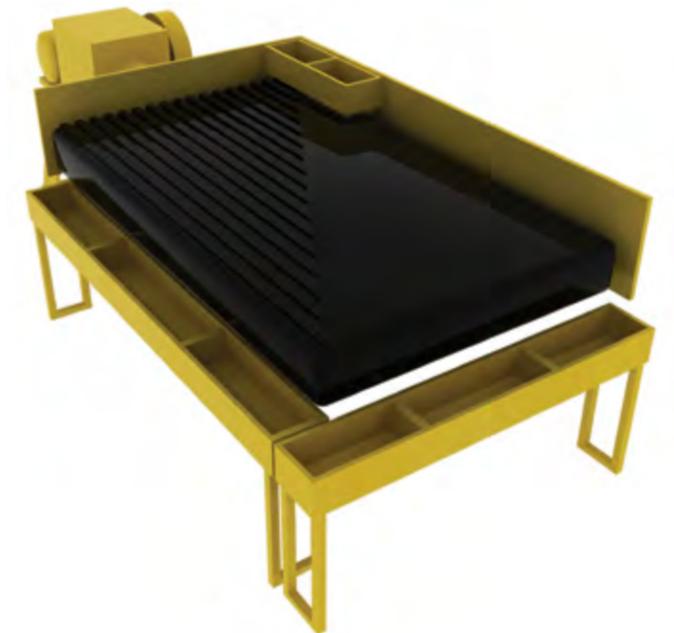
**Longitud.** La longitud del canalón depende de la cantidad de finos presentes en la alimentación. La mayoría de partículas gruesas se recupera en los primeros metros, mientras que los finos requieren de mayor longitud.

**Inclinación.** Las pendientes de los canalones se expresan en porcentajes. Las pendientes más usadas están entre 4 y 5%.

## Mesas de concentración (mesa Wilfley)

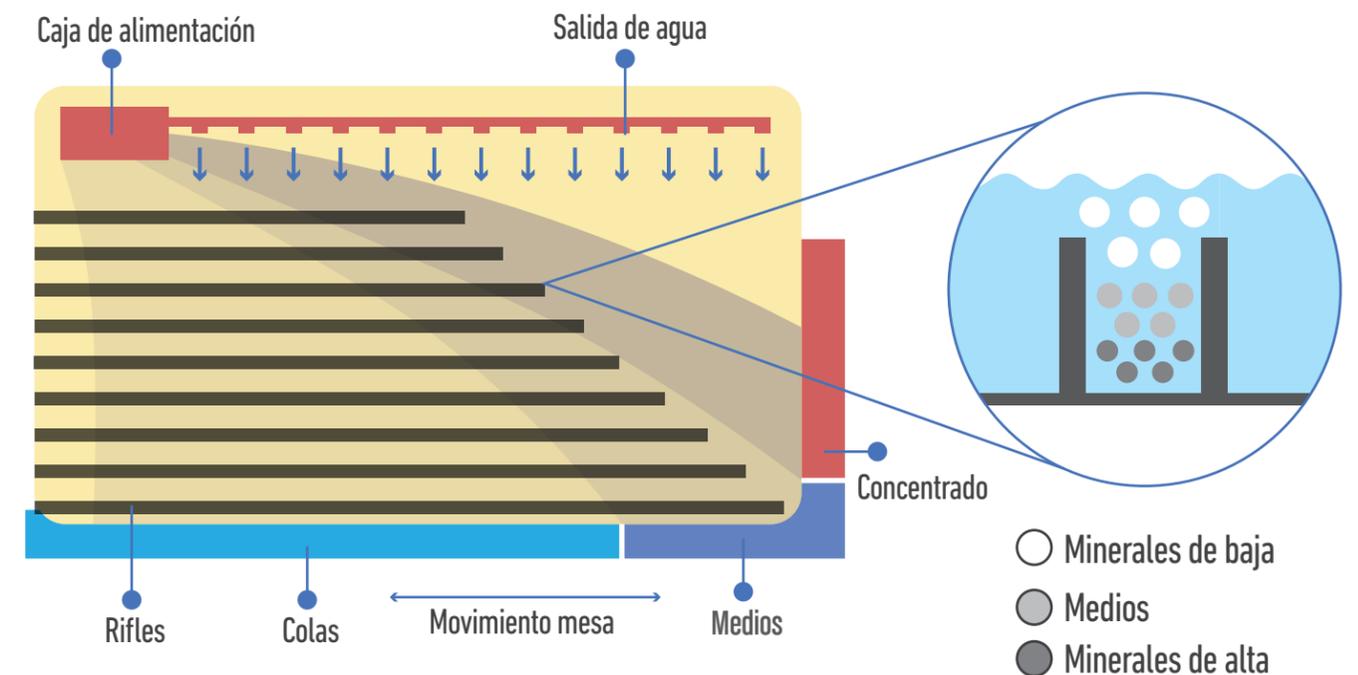
Este concentrador consiste en una mesa ligeramente inclinada con canales o rifles transversales. Se alimenta con una pulpa cuyo peso está constituido en un 25% por sólidos. La pulpa se introduce en la caja de alimentación y se distribuye por medio del agua de lavado que entra a lo largo de la superficie por el lado de la alimentación. La mesa vibra longitudinalmente por medio del mecanismo, lo que produce un desplazamiento lento hacia la izquierda y un retorno rápido hacia la derecha. Esto hace que las partículas minerales se arrastren lentamente a lo largo de la cubierta paralela en dirección del movimiento más lento.

Fotografía 6.8. Modelo de mesa Wilfley. Fuente: autores.



Las partículas se mueven diagonalmente a través de la cubierta desde el extremo de alimentación. Las más pequeñas y pesadas viajan con mayor velocidad hacia el punto de recolección, en el extremo distante, mientras que las partículas más ligeras y grandes son conducidas al lugar de recolección de colas. Se usan colectores con separadores ajustables para recibir el producto concentrado, medios (mezcla de concentrado y ganga) y colas (ganga liberada).

Figura 6.11. Diagrama de funcionamiento de una mesa de concentración gravimétrica. Fuente: autores.



VARIABLES DE DISEÑO
· Geometría de la mesa
· Material de la superficie
· Rifles (forma y distribución)
· Aceleración de sacudidas
· Velocidad del motor

VARIABLES DE OPERACIÓN
· Inclinación e la mesa
· Densidad de la pulpa alimentada
· Caudal de agua de lavado
· Ubicación del punto de alimentación

TAMAÑO EN MICRONES	CAPACIDAD (t/h)
750-250	1.5-3
400-150	1-2
200-75	0.5-1
100-40	0.2-0.5

Fotografía 6.9. Modelo de un concentrador centrífugo. Fuente: autores.



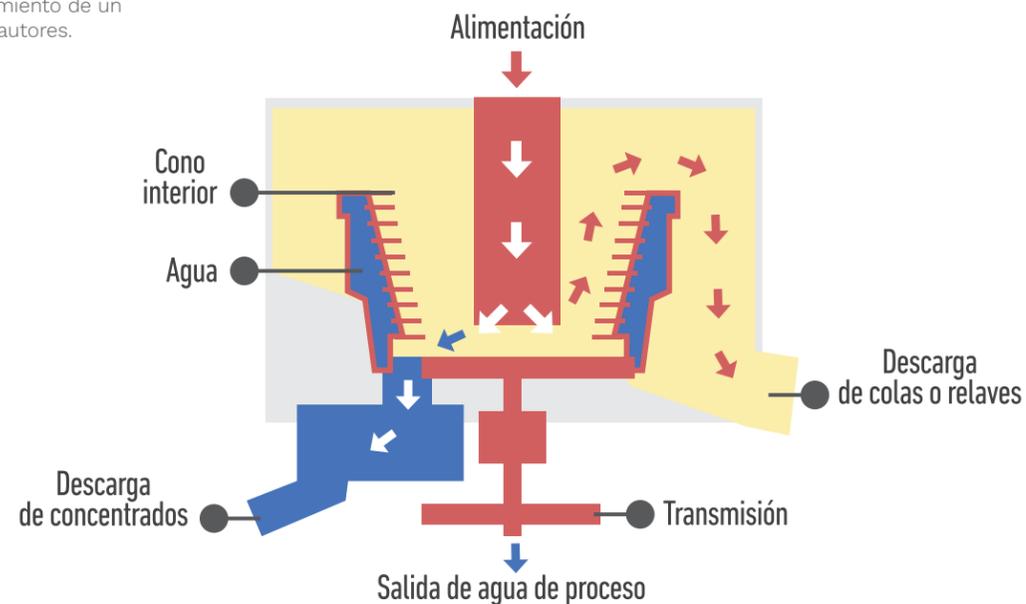
### Concentradores centrífugos (Tipo Knelson o Falcon)

Los concentradores centrífugos son un tipo de concentrador gravimétrico que hace uso de la fuerza centrífuga y que tienen la ventaja de recuperar partículas finas. La capacidad de dichos equipos para cambiar el campo gravitatorio aparente es una alternativa importante en la recuperación de minerales finos como el oro (Wills y Finch, 2016).

Los concentradores centrífugos más utilizados en la industria mineral son los de tipo Knelson y tipo Falcon. Estos equipos tienen la ventaja de ser compactos. Su funcionamiento consiste en la formación de un lecho fluidizado activo en su interior para capturar minerales pesados (Knelson y Jones, 1994). Una fuerza centrífuga de hasta 60 veces la de la gravedad actúa sobre las partículas y permite atrapar las partículas más densas en una serie de anillos (rifles) ubicados en el compartimiento interior del equipo, mientras que las partículas de baja densidad son descargadas al producto de cola. Las capacidades de las unidades

van desde la escala de laboratorio (0,03 t/h) hasta la escala industrial (150 t/h) para partículas que varían en tamaño desde 10 µm hasta un máximo de 6 mm. Generalmente se usa para alimentos en los que el componente denso que se quiere recuperar es una fracción muy pequeña del material total: menos de 0,05% en peso.

Figura 6.12. Diagrama de funcionamiento de un concentrador centrífugo. Fuente: autores.



Las principales variables operacionales de los concentradores centrífugos son las siguientes:

- Tasa de alimentación de sólidos
- Porcentaje de sólidos de la alimentación
- Frecuencia de rotación
- Caudal de agua
- Caudal de aire
- Tiempo de formación del lecho fluidizado
- Tamaño de partícula de la alimentación

## 6.1.6. CONCENTRACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR FLOTACIÓN

Fotografía 6.10. Modelo de celda de flotación industrial. Fuente: autores.

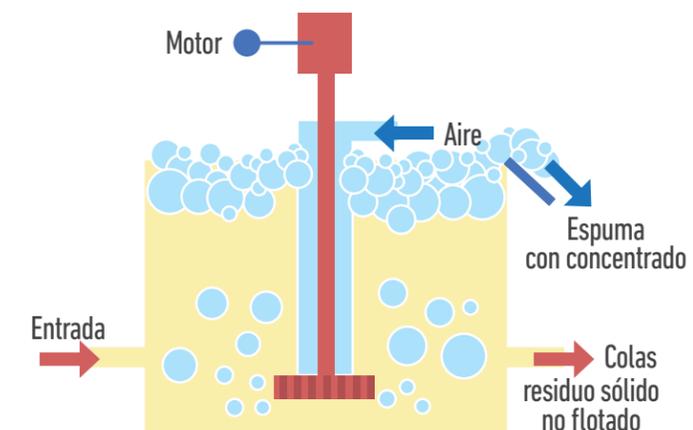


La flotación se basa en la capacidad que tiene la superficie de un sólido de ser o no humectada por el agua.

Cuando dicho sólido se deja humectar, se dice que es hidrófilo (adsorbe agua en su superficie), mientras que, si no se deja mojar, es hidrófobo. Al introducir sólidos hidrófobos en agua, sus superficies no formarán enlaces con los grupos polares; por ende, en presencia de una burbuja que asciende, la partícula sólida se adhiere a ella y la acompaña a flotar en la superficie.

Para retirar este mineral es necesario agregar un reactivo químico (tensoactivo) que disminuye la tensión superficial del agua y permite el paso de las partículas. Este tensoactivo produce una fase de espuma que se puede retirar con una paleta, de forma manual o mecánicamente. Debido a que la gran mayoría de minerales son hidrófilos, es necesario agregar otro reactivo que se adsorba selectivamente sobre la superficie de las partículas de interés. Este reactivo se denomina agente colector y es de enorme importancia en la operación (Bulatovic, 2007).

Figura 6.13. Diagrama de funcionamiento de una celda de flotación. Fuente: autores.



REACTIVOS DE FLOTACIÓN		DESCRIPCIÓN	
Agente espumante	Tensoactivo para generar espuma. Generalmente se usa aceite de pino (0.1 libra por tonelada, aprox.)		
Agente colector	Para el caso del oro, colectores afines al azufre, generalmente xantatos (0.1 libra por tonelada, aprox.)		
Reguladores de pH	Se acostumbra tener un pH de 6 a 7.		

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE OPERACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Porcentaje de sólidos</li> <li>· Densidad del sólido</li> <li>· Densidad del fluido</li> <li>· Cantidad de sólido por hora</li> <li>· Cantidad de celdas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Densidad de la pulpa</li> <li>· Caudal de pulpa por hora</li> <li>· Volumen de trabajo en celdas</li> <li>· Volumen de una sola celda</li> <li>· Longitud de lado de la celda</li> </ul>

## 6.1.7. CIANURACIÓN

El proceso de lixiviación de oro con cianuro es el principal método desarrollado para extraer el metal, y es utilizado en prácticamente todas las grandes operaciones mineras del mundo.

Las razones para su gran aceptación son tanto económicas como metalúrgicas. En general, con este método se recupera más metal que con el proceso de amalgamación, sin contar que es más seguro y simple de operar que procesos con cloro o bromo. La barra de oro final resultante de la operación es prácticamente pura.

El proceso de cianuración se basa en el hecho de que las soluciones de cianuro de potasio o sodio tienen una disolución preferencial hacia las partículas de oro metálico que hacia otros materiales.

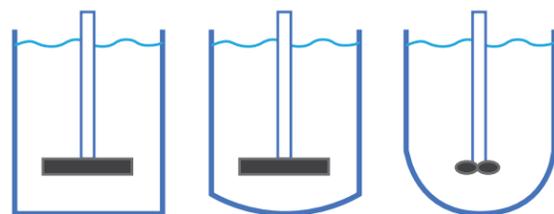
La cianuración es fuertemente afectada por el pH de la solución. Es esencial que la solución de cianuro se mantenga alcalina (altos pH) durante la lixiviación del oro, por las siguientes razones:

- Para prevenir la hidrólisis del ion cianuro
- Para prevenir la descomposición del cianuro por el CO<sub>2</sub> presente en el medio ambiente
- Para neutralizar compuestos ácidos de las menas, tales como sales ferrosas y sulfato de magnesio en las aguas de las plantas, antes de ser agregadas al circuito de cianuración
- Para descomponer el bicarbonato en las aguas de las plantas antes de usarse en la cianuración
- Para ayudar a la sedimentación de partículas, de tal manera que se pueda obtener una solución clara durante la separación de la mena cianurada

La siguiente ecuación engloba la reacción de la cianuración y el compuesto que se analiza.

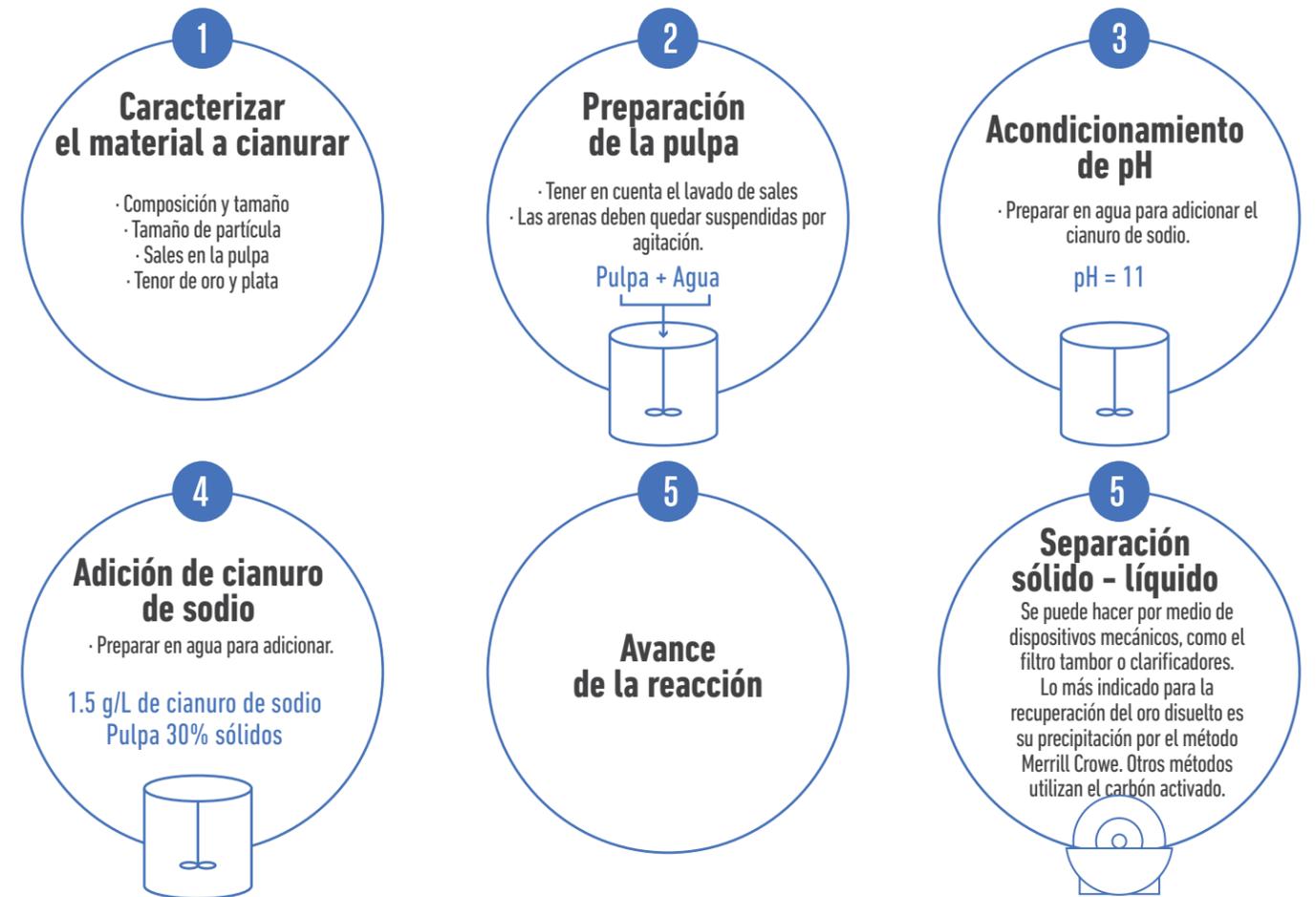


Figura 6.14. Diagrama de tipos de diseño de tanque e impulsores. Fuente: autores.



VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE OPERACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Densidad del sólido (kg/m<sup>3</sup>)</li> <li>· Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)</li> <li>· Volumen de la solución (l)</li> <li>· Velocidad del impulsor (rpm).</li> <li>· Tipo de fondo del tanque: plano, plato, esférico</li> <li>· Tipo de impulsor: Hélice paso cuadrado, 3 palas; Hélice paso de 2, 3 palas; Turbina, 6 palas planas; Turbina, 6 palas curvas; Turbina, 2 palas planas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Volumen del tanque (l)</li> <li>· Diámetro del tanque (m)</li> <li>· Longitud del tanque (m)</li> <li>· Altura de solución (m)</li> <li>· Diámetro del agitador (m)</li> <li>· Ancho del agitador (m)</li> <li>· Distancia fondo agitador (m)</li> <li>· Diámetro de los 4 baffles (m)</li> <li>· Potencia del impulsor (HP)</li> </ul>

Figura 6.15. Diagrama del proceso de cianuración. Fuente: autores.



Hay otros métodos para separar la solución rica de las arenas al finalizar la cianuración. El espesador es un sedimentador que entrega solución clarificada por rebose y una pulpa sedimentada con una concentración de sólidos por peso que puede ser mayor del 80%. Esta pulpa puede impulsarse a un filtro prensa, filtro de tambor, o llevarse a un tanque percolador para recuperar una solución rica y descomponer compuestos ambientalmente dañinos.

Fotografía 6.11. Modelo de filtro prensa y filtro de tambor. Fuente: autores.

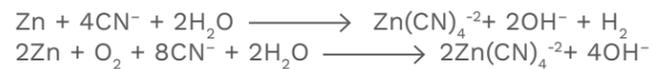


La cianuración industrial de un material aurífero produce una solución cuya concentración de oro está generalmente por encima de dos miligramos de oro por litro (ppm), dependiendo del material lixiviado y del sistema utilizado.

Durante la precipitación de oro en zinc, la solución aurífera entra en contacto con el zinc y espontáneamente, dado que el zinc es mucho más electropositivo que el oro, ocurre un intercambio por medio del cual el zinc metálico se va solubilizando en la solución, mientras el oro se va precipitando desde ella. Una expresión química que representa el modelo de precipitación de oro en zinc es la siguiente:



El zinc puede corroerse por mecanismos que involucren la reducción del agua y oxígeno:



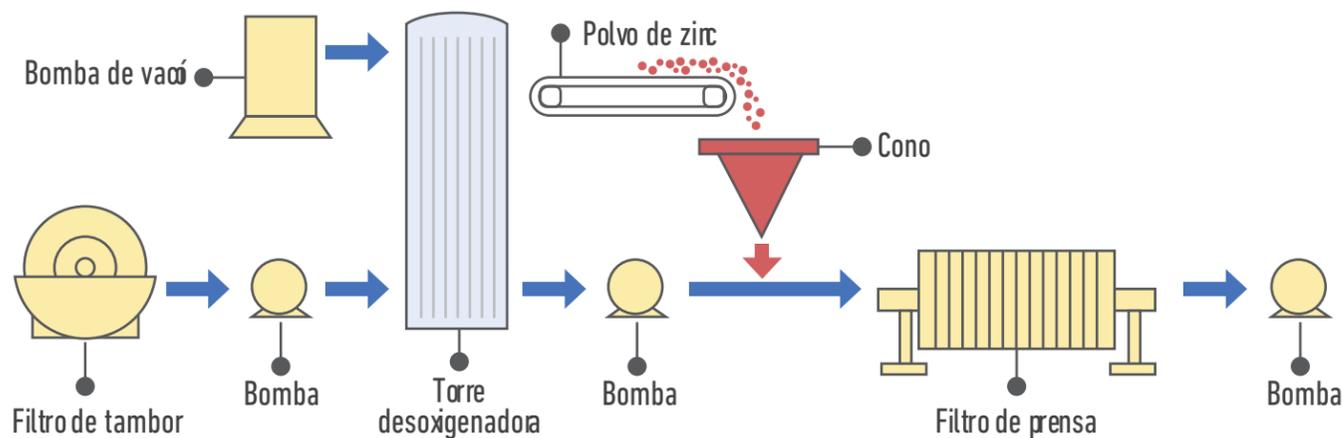
En la práctica se debe adicionar zinc entre cinco y diez veces más que los requerimientos estequiométricos. Asimismo, la presencia de oxígeno disuelto puede provocar la redisolución del oro ya precipitado, por lo que se debe garantizar una condición de vacío para evitarlo. Esto es posible utilizando el sistema Merrill Crowe:



En las condiciones que se aplican típicamente en la industria, se ha encontrado que la transferencia de masa es el paso determinante para el proceso de precipitación. Por ello, es fundamental que el zinc presente una extensa y limpia superficie de reacción (se recomienda zinc en polvo).

La presencia de material particulado fino suspendido en la solución, especialmente arcillas y silicatos coloidales, reduce la eficiencia de la precipitación, posiblemente por cubrir la superficie del zinc, por lo que se debe garantizar un perfecto filtrado de la solución rica.

Figura 6.16. Diagrama del proceso de Merrill Crowe. Fuente: autores.



Es muy conocido el efecto benéfico de los iones de plomo en la precipitación a baja temperatura, debido a sus efectos electroquímicos. Concentraciones de  $\text{Pb}^{2+}$  de 0,01 g/L ejercen un buen efecto en soluciones de 1 a 10 g/t de oro; hay que tener cuidado de no estar por debajo de este valor. Excesos de 0,06 a 0,1 g/L de plomo divalente perjudican el proceso.

Otros iones metálicos divalentes, como Hg, Th, Bi, Cd y Cu, en concentraciones muy bajas, han mostrado efectos similares a los del plomo.

## 6.1.8. FUNDICIÓN

El objetivo de esta operación es procesar los cementos (precipitados de cianuración) de metales preciosos para obtener barras (lingotes) comerciales de oro de alta pureza mediante la determinación de una carga de fundentes apropiada, aplicando las normas de seguridad necesarias.

Fotografía 6.12. Modelo de horno con crisol. Fuente: autores.



Los principales métodos de tratamiento de los precipitados para alcanzar metales preciosos son los siguientes:

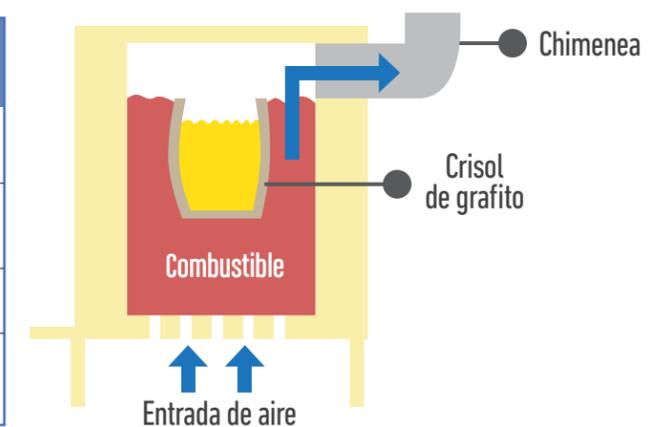
- Fundición directa
- Fundición después de calcinación
- Tratamiento ácido seguido de fundición

### Fundición directa

La fundición directa de precipitados de metales preciosos es una técnica rutinaria utilizada a gran escala. La desventaja de esta operación pirometalúrgica es que el zinc se volatiliza a alta temperatura (> 1100 °C) y suele arrastrar consigo algo de oro, lo cual produce pérdidas que pueden variar del 1 al 5%.

Figura 6.17. Diagrama de horno y crisol. Fuente: autores.

RIESGOS	MEDIDAS DE SEGURIDAD
Inhalación de polvos de calizas y fundentes.	Uso de mascarillas para polvo.
Quemaduras con herramientas calientes, moldes y salpicaduras con escoria fundida.	En general se usan delantales y guantes de asbesto, botas y caretas.
Astillas de escoria sólida y pedazos fluidos de escoria.	Caretas y guantes de asbesto
Quemaduras con ácido	Debe usarse guantes de caucho, ropa a prueba de ácido, caretas y respiradores.



Las cargas de fundición varían dependiendo de las características de los precipitados. Estas se logran partiendo de ensayos de laboratorio preliminares realizados a una muestra del precipitado, y se establecen las cantidades de los reactivos que se van a utilizar. Entre los más comunes se encuentran los siguientes:

- Carbonato de sodio
- Bórax
- Sílice
- Nitrato de potasio

Las respectivas cargas se homogeneizan, se llevan a crisoles de grafito y se recubren con una capa de bórax. Posteriormente, los crisoles cargados se introducen en el horno para efectuar la fundición a una temperatura de 1.100 °C durante un tiempo que oscila entre una y dos horas. La carga se vacía en moldes previamente parafinados para finalmente, luego del enfriamiento, realizar la separación de la barra de oro de la escoria.

## 6.1.9. TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN AGUAS

Para que exista un proceso de beneficio de oro sostenible es importante llevar a cabo el tratamiento de las soluciones resultantes de la cianuración con los métodos presentados en el punto 6.1.7 y una recirculación de las aguas que salen como rechazo en las colas de los procesos de concentración.

Debido a que en las operaciones de concentración es muy poco o nulo el uso de reactivos químicos, es ideal poder separar los residuos líquidos de los sólidos, para llevar el agua recuperada de nuevo al circuito de beneficio y las colas sólidas a disposición en el patio de relaves. Para este fin, el uso de tanques espesadores es el método óptimo y comúnmente empleado para llevar a cabo dicha separación.

### Tanques espesadores

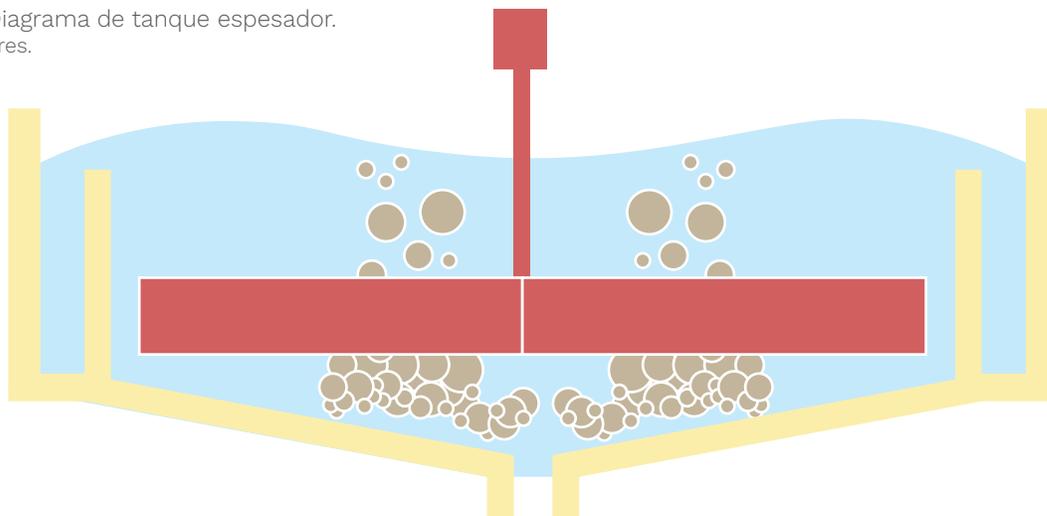
Los espesadores son usados para ampliar la concentración de sólidos de un fluido con el fin de realizar una separación sólido-líquido. El principio básico de operación de un espesador es el proceso de sedimentación, en el que las partículas suspendidas en un líquido van cayendo directamente hacia la parte inferior del tanque por efecto de la fuerza de gravedad, con lo cual se clarifica el líquido sobrenadante, que es descargado por rebose en la parte superior del tanque.

La velocidad de asentamiento es directamente proporcional al tamaño y densidad de las partículas, como también de la densidad y viscosidad del fluido. Cuando las partículas suspendidas son muy pequeñas, se da una suspensión estable. Entonces se utilizan coagulantes o floculantes para romper esta estabilidad de suspensión, a raíz de lo cual las partículas pequeñas se aglomeran y descienden.

Un espesador convencional está compuesto por tanques cilindro-cónicos que constan de un mecanismo que hace girar las hélices que facilitan la descarga del producto por la parte inferior. La alimentación del material (pulpa) llega a un pozo circular en el centro del espesador, que minimiza la agitación. Así se obtiene el líquido claro, que es descargado por rebose en la parte superior de dicho tanque.

El sistema de hélices consiste normalmente en dos brazos radiales unidos a un eje central que, por medio de un motor instalado en la parte superior del eje, mueve lentamente dichos brazos con el fin de promover la colisión y adhesión de las partículas, que son arrastradas hacia el punto de descarga situado en la zona cónica.

Figura 6.18. Diagrama de tanque espesador.  
Fuente: autores.



Fotografía 6.13. Modelo de tanque espesador. Fuente: autores.



# 7. ASPECTOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

La contaminación química generada por las diferentes técnicas aplicadas en la metalurgia extractiva es un problema que altera tanto la calidad de los suelos como la de los efluentes involucrados en dichos procesos, lo cual desencadena una alteración ambiental. Por ello la evaluación de su estado y composición es fundamental para el desarrollo del marco químico y ambiental, que con el uso de diferentes métodos químicos, instrumentales y analíticos clásicos busca caracterizar y cuantificar los agentes contaminantes, así como determinar su movilidad e incidencia, con miras a la elaboración de propuestas específicas para tratar y atenuar el impacto ambiental generado.

En este estudio se expone la información obtenida en algunas zonas mineras del municipio de Puerto Libertador. El desarrollo del estudio parte de la selección de muestras representativas líquidas y sólidas tomadas en las etapas de finalización de los procesos de beneficio, como son muestras de relaves y de vertimientos generados por la labor minera, además de las muestras tomadas en los puntos críticos de las fuentes hídricas, como ríos, quebradas y nacimientos, entre otros, que presentan un alto riesgo de contaminación por su cercanía con la actividad minera. Se visitaron las quebradas San Matías, Buenos Aires y Valdés.

---

Panorámica de la cancha de relaves en El Alacrán. Fotografía tomada por Oscar Cardona, Servicio Geológico Colombiano

# 7.1. CONTRIBUCIÓN QUÍMICA A LA CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS Y AMBIENTALES

Con los análisis químicos de los materiales de mina, planta de beneficio y relaves es posible obtener la siguiente información:

Figura 7.1. Diagrama de contribución química y ambiental. Fuente: autores.



El reconocimiento de la importancia de los recursos naturales permite evaluar la dimensión del impacto que genera la actividad minera en su entorno y el manejo inadecuado del mismo. Esto deriva en la necesidad de realizar estudios químicos y ambientales que, junto con los estudios metalúrgicos y geológicos, permiten identificar si los efectos de los agentes contaminantes tienen origen en las actividades de beneficio (de origen antropogénico) o en la naturaleza de la formación geológica de los depósitos (de origen geogénico).

Fotografía 7.1. Años de acumulación de relaves en la zona del Alacrán con familias que viven en ellos. Fuente: autores.



## 7.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: MÉTODOS Y APLICACIONES QUÍMICAS Y AMBIENTALES

### 7.2.1. CONTAMINACIÓN POR MERCURIO

El mercurio, por ser líquido a temperatura ambiente y por tener una presión de vapor baja, tiene una significativa movilidad en el aire. El valor de solubilidad en el agua, de 0,02 mg/L a 25 °C, indica que es de mediana movilidad en agua, y el valor Log Kow de 5,95 muestra su alta afinidad con la biota animal. Además, el mercurio no solo es altamente bioacumulable, sino que forma parte de una cadena trófica; las especies mayores, como el hombre, pueden no solo acumularlo, sino biomagnificarlo en su organismo.

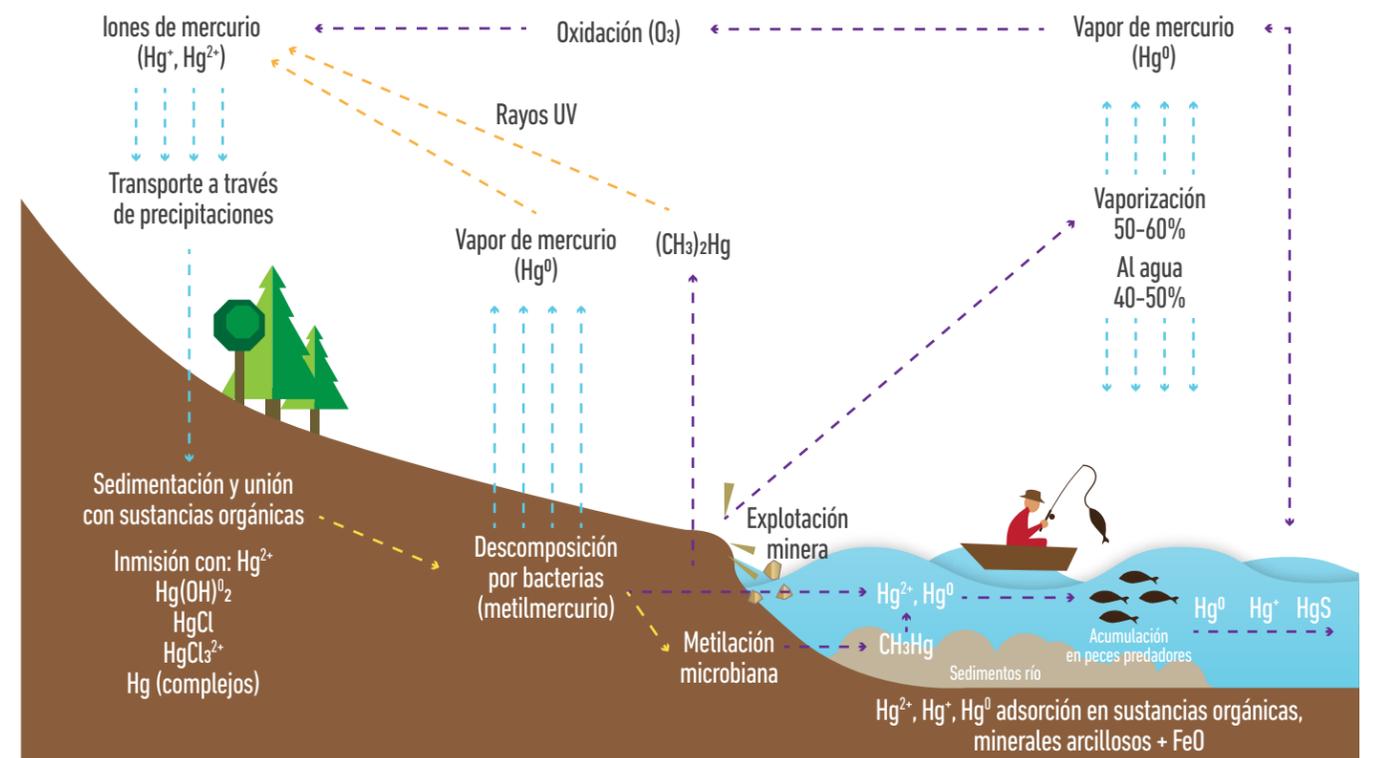
El mercurio se presenta en la naturaleza en diferentes especies químicas: las de tipo elemental ( $\text{Hg}^0$ ), las de tipo inorgánico ( $\text{Hg}^+$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ) y las orgánicas. El metilmercurio ( $\text{HgCH}_3$ ) y el dimetilmercurio ( $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$ ) son las formas orgánicas más tóxicas, y afectan el sistema inmunológico, alteran los sistemas genéticos y enzimáticos y dañan el sistema nervioso, incluyendo la coordinación y los sentidos del tacto, el gusto y la vista.

Las principales manifestaciones por intoxicación con mercurio en el organismo humano son los daños en el sistema nervioso, daños cerebrales, daño del ADN y de los cromosomas, reacciones alérgicas, cansancio, dolor de cabeza, así como defectos de nacimiento y abortos.

El mercurio en estado cero es móvil en el ambiente debido a que es ligeramente soluble en el agua (56 ug/L). Por lo tanto, puede contaminar las aguas subterráneas y las fuentes superficiales de agua, debido a la disposición de colas de procesos de amalgamación. No todos los acuíferos resultan con concentraciones extremas de mercurio (Barringer et al., 2012). Sin embargo, un estudio determinó que en una mina de oro y plata, el mercurio de las colas de proceso se lixivió y contaminó las aguas subterráneas, donde alcanzó concentraciones de hasta 15 ug/L (Foucher et al., 2012).

Otro riesgo es la práctica de cianuración de arenas previamente usadas en amalgamación, ya que el cianuro forma con el mercurio complejos estables, solubles y difíciles de remover ( $\text{Hg}(\text{CN})_2$  y  $\text{Hg}(\text{CN})_4$ ). La lixiviación de complejos cianuro-mercurio (usualmente en forma  $\text{Hg}^{+2}$ ) incrementa la concentración de mercurio en las aguas subterráneas (Coles y Cochrane, 2006).

Figura 7.2. Diagrama de ciclo del mercurio (Hg). Fuente: autores.

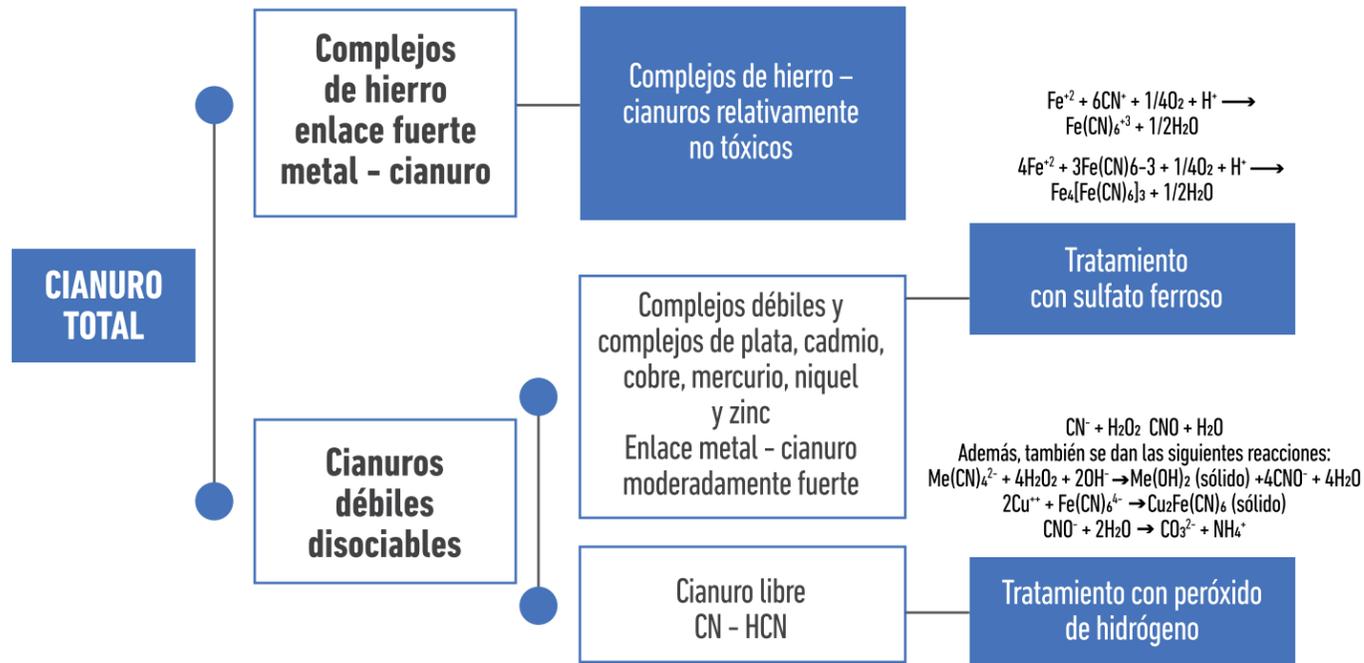


La Ley 1658 de 2013 desarrolla el marco legal “por medio del cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones”. Los ministerios de Minas y Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Salud y Protección Social, Trabajo, Agricultura y Desarrollo Rural, Transporte y Comercio, e Industria y Turismo, formularon el Plan Único Nacional de Mercurio (Ministerio de Medio Ambiente, 2014)

De igual manera, la Ley 1658 hace referencia a las denominadas “alternativas limpias”. En este punto, Colciencias fomentará la realización de investigaciones de tecnologías limpias para la reducción y eliminación del mercurio en los diferentes procesos dirigidos a obtener el metal precioso. Los ministerios de Minas y Energía; Comercio, Industria y Turismo; Educación y el SENA promoverán y desarrollarán, en el marco de sus competencias, la realización de programas de formación, capacitación, fortalecimiento empresarial y asistencia técnica para la inserción de las tecnologías limpias en los procesos de beneficio de oro y demás procesos industriales y productivos asociados.

## 7.2.2. CIANURO EN MINERÍA

Figura 7.3. Clasificación de los compuestos de cianuro en la minería de oro y el tratamiento de descomposición aplicado. Fuente: autores.

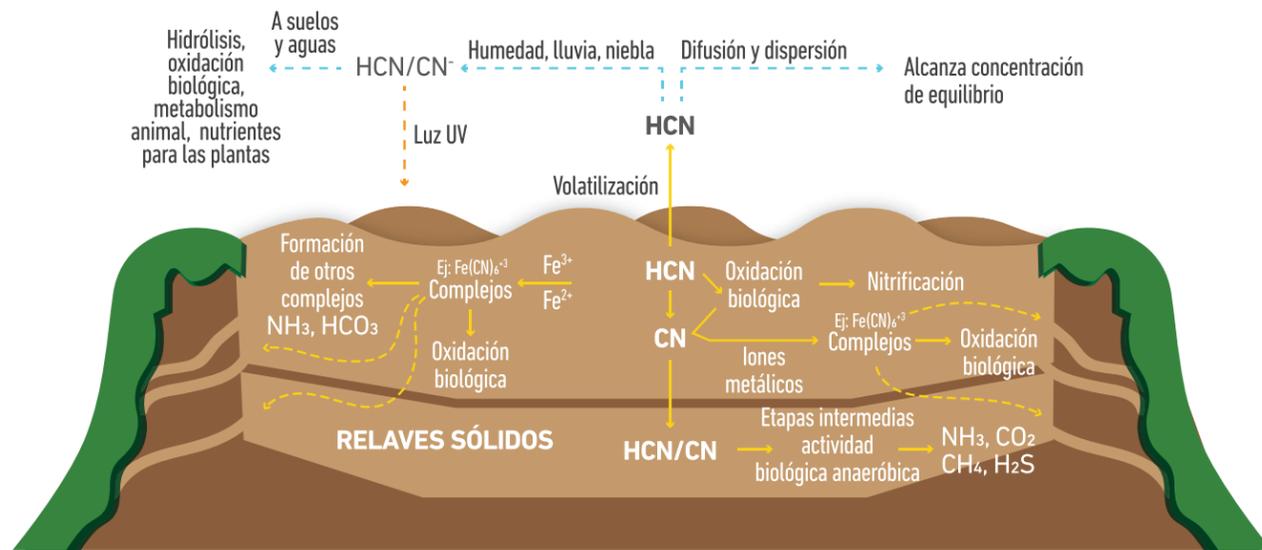


Los compuestos de cianuro presentes en la minería del oro y en las soluciones y efluentes de cianuración, comprenden el cianuro libre, sales de cianuro de metales alcalinos y alcalino-térreos y complejos de cianuros metálicos formados con oro, mercurio, cadmio, zinc, plata, cobre, níquel, hierro y cobalto, elementos que componen los minerales procesados para obtener el oro. En la figura 7.3 se pueden observar los compuestos de cianuro que se forman en el proceso de cianuración.

### 7.2.2.1. DINAMICA DEL CIANURO EN UN RELAVE DE RESIDUO MINERO

Debido a las muchas reacciones y transformaciones que experimenta de forma natural, el cianuro no persiste en el ambiente. Los procesos de descomposición y transformación del cianuro son muy efectivos para reducir las concentraciones de cianuro tanto en el agua del estanque de decantación como en los propios relaves.

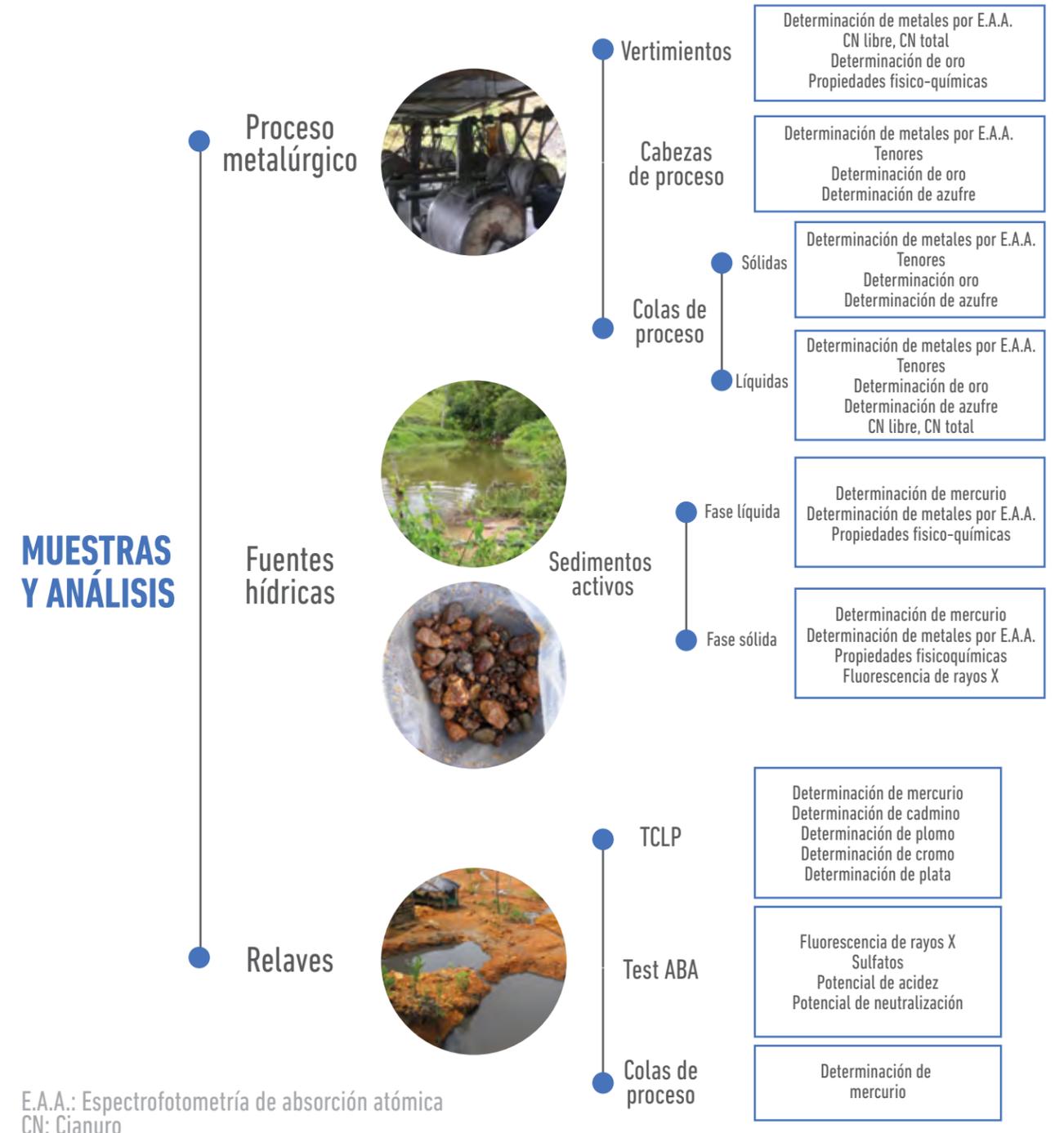
Figura 7.4. Reacciones bioquímicas del cianuro en un material residual de la cianuración. Fuente: Modificado Cáceres, 2001.



En diversos estudios se han realizado perforaciones para investigar los niveles de cianuro en profundidad en las áreas de almacenamiento de relaves. También se ha realizado un muestreo lateral en el almacenamiento de relaves para determinar cómo varían las concentraciones de cianuro desde el punto de depósito. Dependiendo de la profundidad y el tiempo de acumulado de los relaves, el cianuro en el agua de poro de los relaves puede sufrir muchas transformaciones.

La perforación muestra que la concentración de cianuro disminuye significativamente con la profundidad, debido a los procesos de descomposición y transformación. Entre los cuatro y seis metros superiores de un estanque de relaves activo, el cianuro libre se descompone rápidamente.

Figura 7.5. Diagrama de flujo para toma de muestras y análisis químico-ambiental. Fuente: autores.



Sin embargo, por debajo de esa profundidad, el cianuro WAD restante está presente principalmente como complejos de cianuro de cobre. Los procesos de transformación convierten el cianuro de cobre en la forma no tóxica de cianuro de hierro y CuCN insoluble. El cianuro de hierro es un complejo muy estable.

En la figura 7.4 presenta un esquema simplificado del ciclo del cianuro para poner en evidencia las diversas especies que se forman a partir del cianuro libre en tanques de relaves.

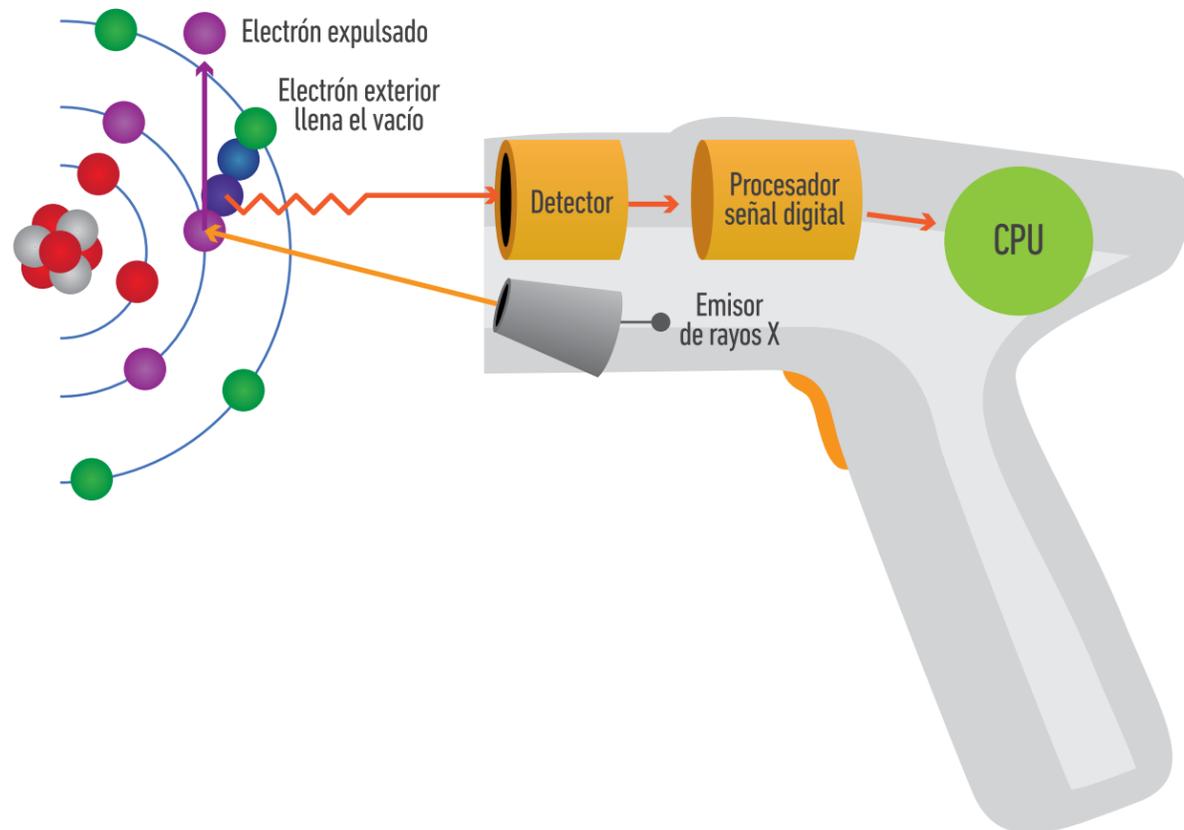
### 7.2.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y AMBIENTAL

La aplicación de diferentes técnicas analíticas, instrumentales y gravimétricas, como la fluorescencia de rayos X, espectrofotometría de absorción atómica, potenciometría (ion CN), determinación de azufre por gravimetría y pruebas ambientales de TCLP y test ABA, se aplican a la caracterización de la composición físico-química de muestras representativas de las etapas de procesamiento de minerales que inciden en el equilibrio del medio ambiente; el análisis parte de hacer una comparación de las muestras antes y después de dichos procesos. Los tipos de muestras recolectadas son relaves, sedimentos, rocas y vertimientos, a los que se les aplica como estudio prioritario la cuantificación y movilidad de mercurio, por ser un metal pesado de alta toxicidad. Además, el análisis químico se interrelaciona con el marco geológico para obtener información útil para determinar la composición elemental de los minerales formadores de roca y mineralizantes que componen las unidades geológicas presentes en la zona estudiada. En el marco metalúrgico, el seguimiento de las diferentes pruebas realizadas posibilita el control de las unidades metalúrgicas con miras a desarrollar procesos de beneficio más eficientes.

Como información de base para la aplicación y el desarrollo de las metodologías químicas y ambientales enfocadas en cada zona estudiada, se estructuró un diagrama de flujo que contiene específicamente los análisis realizados en las plantas y fuentes hídricas visitadas.

#### 7.2.3.1. APLICACIÓN DE LA ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Figura 7.6. Fluorescencia de rayos X. Fuente: modificado Thermo, 2015.



Esta es una técnica no destructiva que emplea una cantidad pequeña de muestra para determinar el contenido de varios elementos en una misma lectura. El resultado es una especie de mapa de la composición química del material en fase sólida. La espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) tiene su fundamento en la interacción existente entre los rayos X y la materia, debido a que un material irradiado y excitado por rayos X se reordena y emite una radiación llamada fluorescencia de rayos X, que aporta información sobre el contenido de elementos en las muestras analizadas (Skoog, 2001). Los rayos X son producidos por el analizador y apuntados a una superficie de la muestra. La energía de dichos rayos hace que los electrones de la capa interna de los átomos sean expulsados, con lo cual los electrones que se encuentran en capas más externas se desplazan para llenar las vacantes dejadas; este proceso genera rayos fluorescentes; estos rayos entran en el detector, que envía pulsos electrónicos al preamplificador, que amplifica las señales y las envía a la señal digital del procesador (DSP), que a su vez recoge y digitaliza los eventos de rayos X y envía el espectral como datos a la CPU principal para su procesamiento. Esta analiza los datos espectrales para producir una composición detallada de análisis y datos de composición, entre otros.

Las muestras sólidas pueden ser rocas, sedimentos activos, relaves, cabezas de proceso, productos intermedios y material de rechazo. En el momento de realizar el análisis, dichas muestras deben estar pulverizadas por debajo de los 75 micrones. Se utilizan entre 2 y 5 gramos de muestra, que son depositados en un portamuestras. El análisis se hace que un equipo de fluorescencia de rayos X. Existen dos formas de realizar el análisis: en modo minería, en caso de que se desee determinar qué elementos se encuentran mayoritariamente, por lo general por encima del 1% másico, y el modo suelos, usado para analizar trazas o elementos minoritarios en partes por millón.

#### 7.2.3.2. APLICACIÓN DE LA ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Para realizar la determinación de metales (Au, Cu, Zn, Ag, Cr, Pb, Cd, etc.) por absorción atómica de llama es necesario tener las muestras en solución, y libres de posibles interferentes, tales como materia orgánica o particulado. Para lograr estas condiciones, y con el objeto de reducir la interferencia por materia orgánica y liberar los metales de la matriz manteniéndolos en solución, es necesario tratar previamente las muestras y realizar el procedimiento de preparación, digestión y preservación. Estos tratamientos se realizan según el tipo de matriz.

El mercurio también es medido con esta técnica, pero tal medición se realiza en ausencia de llama debido a su fácil volatilidad. Esta metodología se denomina absorción atómica-generación de hidruros.

Generalmente las muestras provienen de diversos orígenes, y las más frecuentes son las muestras de aguas, efluentes, rocas, suelos, etc. Como todas las matrices varían, son diferentes en su composición intrínseca y en su respuesta al tratamiento previo de adecuación a la medición por llama.

La siguiente ecuación engloba la reacción de la cianuración y el compuesto que se analiza:

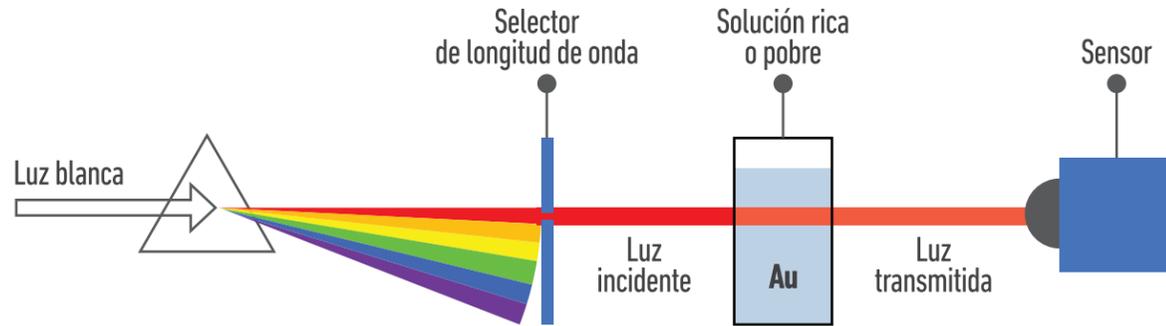


Esta técnica se emplea en la determinación de oro en muestras líquidas cianuradas de procesos metalúrgicos, específicamente de procesos de cianuración en los que se obtienen soluciones ricas en dicho metal, cuando es necesario conocer sus concentraciones para efectos de controlar el proceso, como son las velocidades de disolución del oro, el consumo de cianuro, cal y oxígeno. En el control de recuperación de oro en procesos de precipitación con zinc, este análisis genera la información para evaluar en general la cinética de reacción, los porcentajes de recuperación y la efectividad de la lixiviación.

#### 7.2.3.3. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA ESPECTROFOTOMETRÍA DE ULTRAVIOLETA VISIBLE

El principio de la espectrofotometría ultravioleta-visible involucra la absorción de radiación ultravioleta visible por una molécula, lo cual causa la promoción de un electrón de un estado basal a un estado excitado, liberándose el exceso de energía en forma de calor. La longitud de onda ( $\lambda$ ) comprende entre 160 y 800 nm.

Figura 7.7. La técnica instrumental de ultravioleta visible es una alternativa de medición cuando no se cuenta con el equipo de absorción atómica para determinar el oro. Fuente: autores.



### Método colorimétrico para la determinación de oro en campo (púrpura de Cassius)

La determinación de oro por colorimetría es una alternativa de análisis instrumental aplicada en caso de no contar con espectrofotómetro de absorción atómica (AA). Este método es aplicable en trabajo de campo. Para la determinación de microcantidades de oro en soluciones cianuradas se realiza la precipitación con zinc con el objeto de eliminar interferencias. Esta precipitación se realiza con soluciones cianuradas que contengan una concentración de cianuro mayor que o igual a 1 g/L, y que se encuentren a valores de pH mayores de 11 unidades. El precipitado formado se disuelve y se desarrolla el color usando el método de cloruro estañoso. Este reactivo permite cuantificar oro en soluciones usando la prueba del método púrpura de Cassius.

### 7.2.3.4. APLICACIÓN DE LA POTENCIOMETRÍA DE ION CIANURO

Para determinar la cantidad de cianuro que se encuentra presente en una solución de proceso o solución final con el propósito de desecharla es necesario aplicar metodologías instrumentales que combinan destilación y potenciometría. Una de estas es la descomposición de cianuro total a libre, que se realiza mediante el método de electrodo de ion selectivo integrado a un analizador de cianuro. El procedimiento se fundamenta en la destilación de la solución de cianuro mediante enfriamiento de aire; el ácido cianhídrico (HCN) producido durante la reacción es condensado y absorbido por burbujeo en una solución de hidróxido de sodio (NaOH 0,1 N) e inmediatamente es detectado y leído usando el electrodo de ion selectivo para cianuro. El análisis permite determinar cianuro total en cualquier tipo de soluciones, con un rango de detección desde cinco ppb a 260 ppm. Puede ser aplicado para analizar aguas residuales, aguas procedentes de procesos metalúrgicos y actividad minera. El equipo utilizado en esta metodología es el cianurómetro.

Figura 7.8. Proceso de titulación de cianuro libre y cianurometro utilizado en el laboratorio del SGC sede Cali. Fuente: autores.



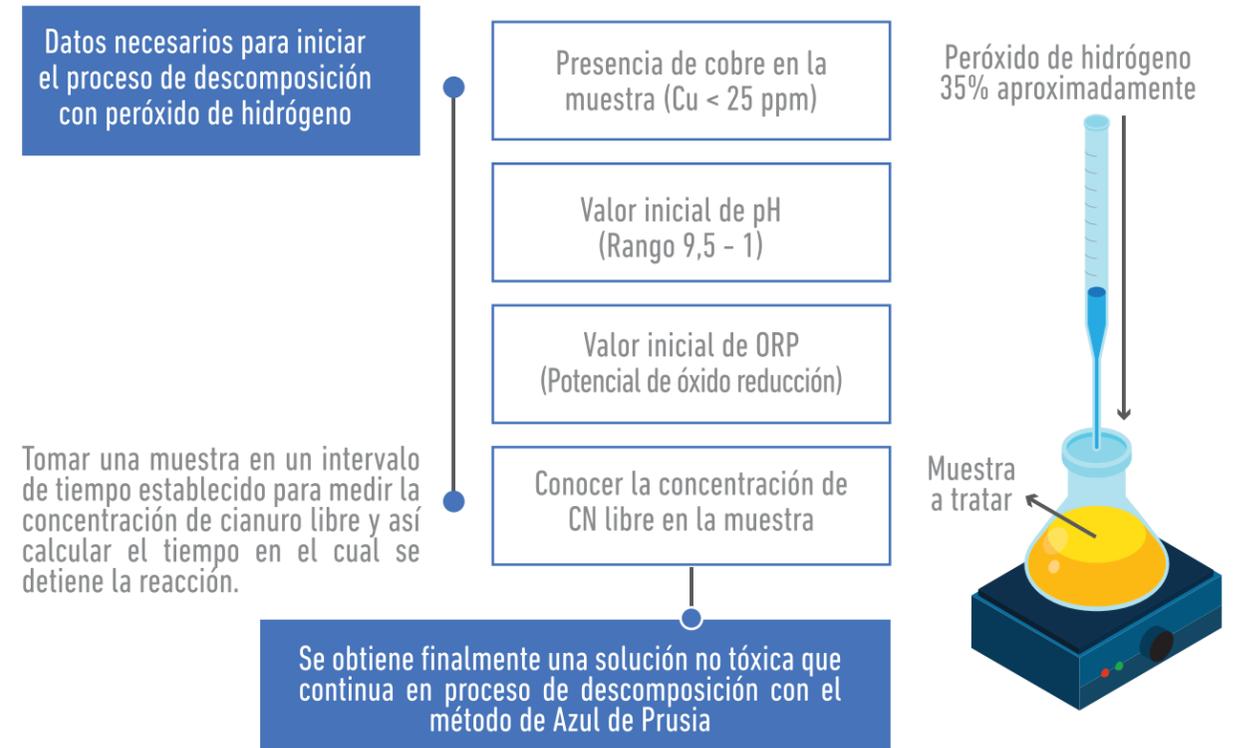
### 7.2.3.5. TRATAMIENTOS DE DESCOMPOSICIÓN DE CIANURO

De acuerdo con lo expuesto existen dos formas principales de cianuro: libre y complejo. Para descomponer el cianuro libre se utiliza el método de descomposición con peróxido de hidrógeno al 35%; en ocasiones se encuentran en el mercado concentraciones mayores que pueden utilizarse de acuerdo al cálculo de reacción.

El diagrama presentado para ilustrar el método evidencia los parámetros físico-químicos que deben tenerse en cuenta en el proceso y los equipos que se requieren.

### Método para descomponer el cianuro complejo presente en la solución pobre

Figura 7.9. Tratamiento método peróxido de hidrógeno - descomposición cianuro libre. Fuente: autores.



### CÁLCULO PARA LA DOSIFICACIÓN DE PERÓXIDO

Los valores necesarios para realizar el cálculo son los siguientes:

Concentración de cianuro libre.

Volumen de muestra que se tratará en mL.

Concentración de peróxido: ficha técnica del insumo o titulación con permanganato de potasio y ácido sulfúrico. Densidad del peróxido a la concentración y temperatura usadas.

**Convertir a peso de CN<sup>-</sup>:**

**X = cualquier cantidad / NaCN = cianuro de sodio / CN = cianuro**

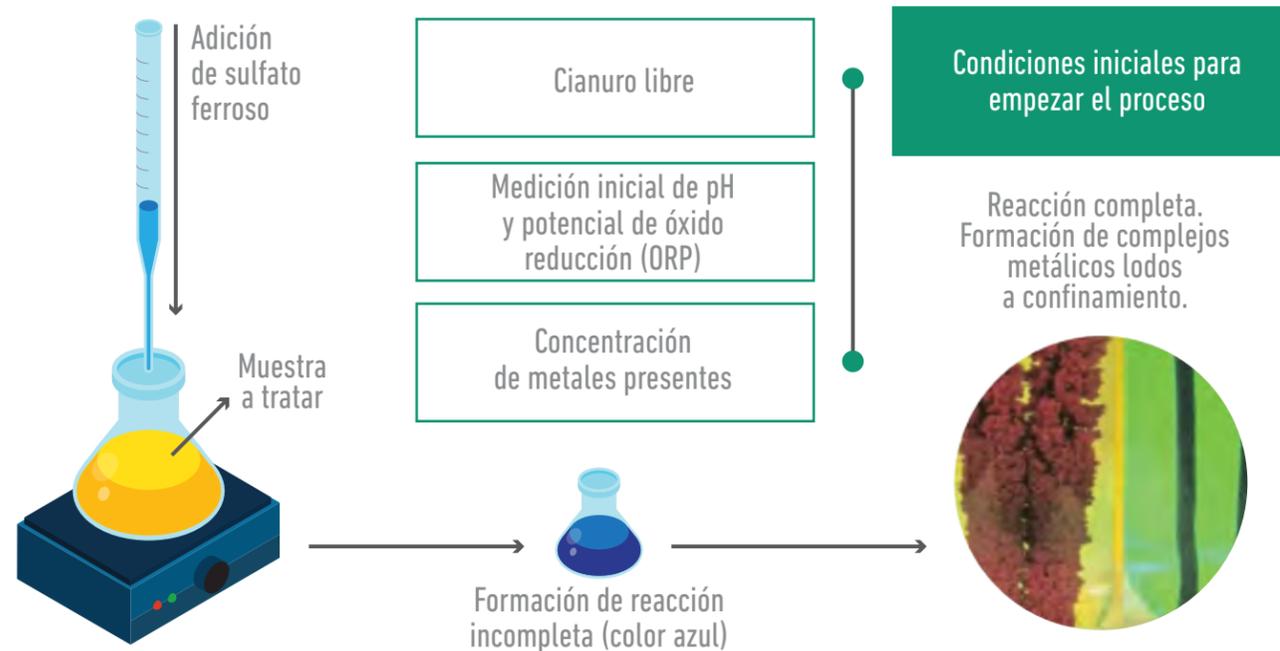
$(X \text{ mg NaCN/L}) \cdot (1/1000\text{mg}) \cdot (1\text{mol de NaCN}/49,00\text{g NaCN}) \cdot (1\text{mol CN}^-/1\text{mol NaCN}) \cdot (26,02\text{g CN}^-/1\text{mol de CN}^-) = \text{g de CN}^-/\text{L}$

**Fórmula para el consumo de peróxido, relación 5 a 8 veces:**

$X \text{ g CN}^-/\text{L} \cdot \text{volumen de muestra que se van a tratar} \cdot 5 = \text{g de H}_2\text{O}_2$   
 $(\text{g de H}_2\text{O}_2/0,35)/1\text{ml}/1,19\text{g H}_2\text{O}_2 = \text{volumen en ml que se va a gastar de H}_2\text{O}_2$

La metodología del azul de Prusia es el proceso final para completar la descomposición de todos los complejos metálicos transformándolos en compuestos más estables y que no generen impacto negativo en condiciones ambientales. El material (lodo) producto de este proceso es llevado a confinamiento.

Figura 7.10. Diagrama de descomposición de cianuro complejo mediante el método azul de Prusia. Fuente: autores.



### CÁLCULO PARA LA DOSIFICACIÓN DEL SULFATO FERROSO (FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O).

Los siguientes son valores necesarios para realizar el cálculo:  
 Concentración de cianuro libre no detectable (rango de trabajo ácido formación de HCN si la Rx continúa).  
 Concentración de cianuro total: destilación y titulación o cianurómetro (complejo).  
 Volumen de muestra que se va a tratar en mL para escalar y en litros en planta.  
 Concentración de sulfato ferroso: 33%.

#### Convertir a moles de CN<sup>-</sup>:

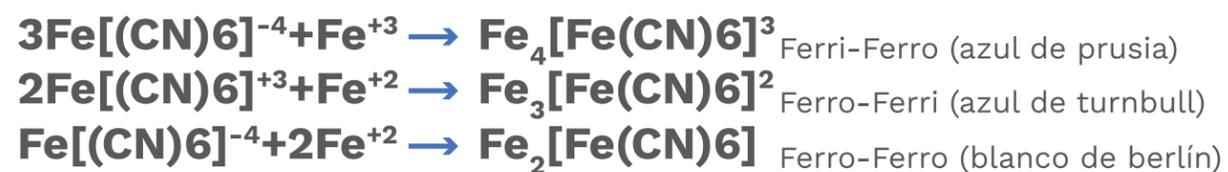
**X = cualquier cantidad / NaCN = cianuro de sodio / CN = cianuro**  
 (X mg NaCN/L) \* (1/1000mg) \* (1mol de NaCN/49,00g NaCN) \* (1mol CN<sup>-</sup>/1mol NaCN) = **moles de CN<sup>-</sup>/L**

#### Fórmula para el consumo de sulfato ferroso, relación 0,5 a 5 veces:

X moles CN<sup>-</sup>/L \* volumen de muestra que se va a tratar \* 0,5 o 5 = **moles de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O**  
 (Moles de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O \* 278,05g FeSO<sub>4</sub>/1mol FeSO<sub>4</sub> \* concentración de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O = **volumen que se va a necesitar de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O al 33%**

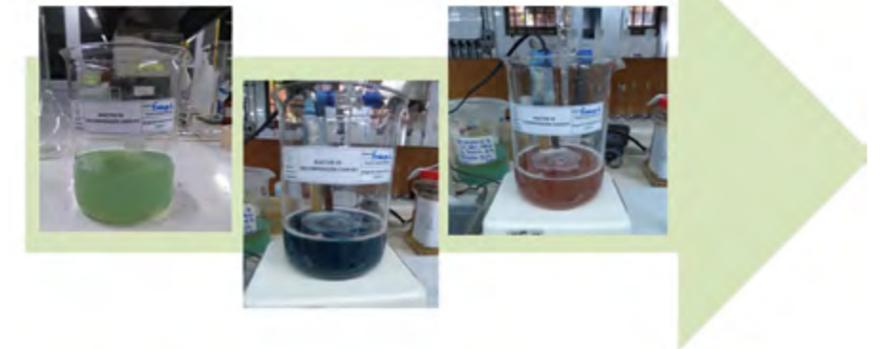
### 7.2.3.6. ENSAYO EN LABORATORIO DE LA DESCOMPOSICIÓN DE CIANURO LIBRE Y COMPLEJO A FORMAS ESTABLES

La concentración de cianuro total puede disminuir en el transcurso del tiempo y llegar al valor mínimo o a uno no detectable. Los colores de estas reacciones, azul, verde y marrón, son los típicos de la precipitación de cianuro; el exceso de hierro a pH ácido promueve la formación de las siguientes sales complejas y muy estables:



En carencia de hierro se puede formar azul de Prusia soluble, que luego se convierte a hexacianoferrroso soluble. Al final de la coagulación-floculación se obtiene un color azul que indica que el tratamiento es incompleto. La solución final se torna marrón.

Figura 7.11. Característica física (color) de las etapas de la descomposición de cianuro libre y complejo. Fuente: autores.



### 7.2.3.7. PRUEBAS AMBIENTALES PARA RELAVES

#### Prueba de toxicidad TCLP (toxicity characteristics leaching procedure)

El análisis de TCLP es una prueba de lixiviación que mide la liberación de contaminantes en un residuo sólido cuando entra en contacto con fases líquidas. Hace parte de las pruebas de interés que se aplican a residuos de beneficio de minerales auríferos, junto con las pruebas de reactividad de cianuros y sulfuros.

#### Prueba de test ABA

El drenaje ácido de rocas o de minas es un proceso natural producido por la oxidación atmosférica (por ejemplo, por la acción del agua, oxígeno y dióxido de carbono) de los minerales de sulfuro de hierro, pirita y pirrotita en la presencia de oxígeno, agua y bacterias como la Thiobacillus ferrooxidans.

La exposición de minerales sulfurados al ambiente ocurre cuando se abren túneles, se remueve material estéril de una mina y se disponen residuos del proceso de beneficio del mineral de interés (Leal, 2015).

Los minerales, al entrar en contacto con el aire, pueden sufrir procesos de oxidación química y lixiviación de metales, metaloides y aniones. Posteriormente, el agua del ambiente interactúa con los óxidos formados para generar agua ácida, que contiene iones de metales pesados que, al ser arrastrados a fuentes de agua superficial o subterránea, las contaminan. En la figura 11 se muestra el proceso de generación de drenaje ácido. Estas reacciones geoquímicas se aceleran en áreas mineras debido a que el aire entra en contacto con mayor facilidad con los sulfuros durante las labores de acceso y debido a la porosidad creada en las pilas de estériles y residuos, así como por el cambio de composición química y el incremento de la superficie de contacto de las partículas (Aduvire, 2006).

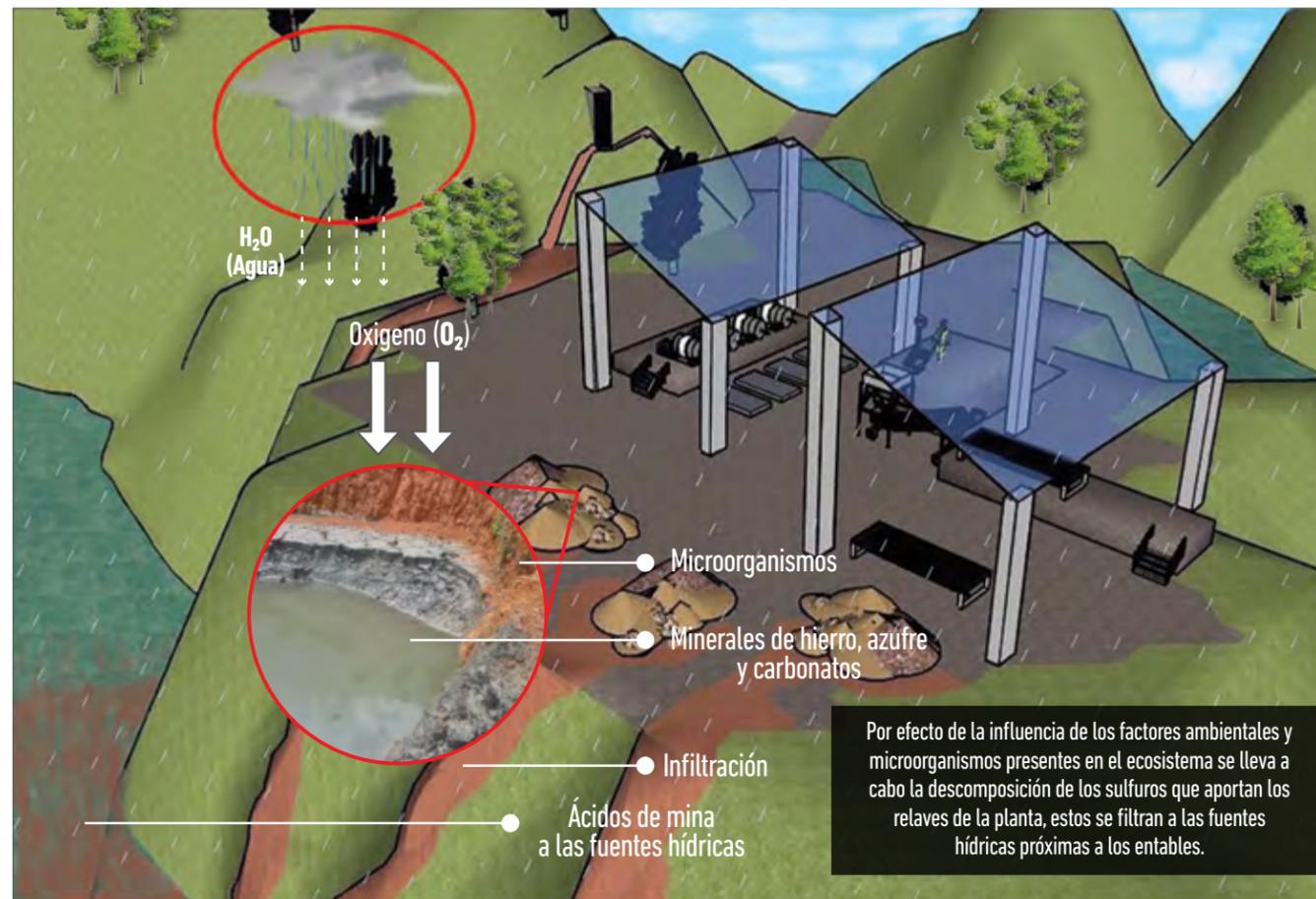
Figura 7.12. Concentraciones máximas permitidas para prueba de TCLP. Fuente: autores.

ELEMENTO	PERMISIBLE EN EL LIXIVIADO* mg/L
Arsénico - As	5,0
Bario - Ba	100
Cadmio - Cd	1,0
Cromo - Cr	5,0
Plomo - Pb	5,0
Mercurio - Hg	0,2
Selenio - Se	1,0
Plata - Ag	5,0

\*Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP-Decreto 4741 de 2005.

**La prueba de TCLP clasifica si el residuo es peligroso o no; entonces no son aplicables los valores de descarga para residuos industriales líquidos, y en cambio se usan los límites asociados a concentraciones máximas que se pueden lixiviar de las muestras; esto depende del metal.**

Figura 7.13. Proceso de generación de drenaje ácido de minas. Fuente: autores.



Los drenajes ácidos de mina, además de un bajo pH, contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión con un alto contenido en sulfato y metales (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni) que son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cursos de aguas y pueden causar daños en las estructuras construidas por el hombre (Aduvire, 2006<sup>9</sup>). Generalmente, la producción de ácido de un material se mide en función de la presencia de azufre en el mineral. Las siguientes reacciones químicas describen la oxidación de pirita (FeS<sub>2</sub>) y su transformación en los productos que constituyen el DAM.

## 7.3. PUNTOS DE MUESTREO VISITADOS Y MUESTRAS PUNTUALES ANALIZADAS

En el municipio Puerto Libertador se visitaron el entable Teherán, la quebrada San Matías, el entable Pirita, el entable Buenos Aires, la quebrada Buenos Aires, los entables El Alacrán y la quebrada Valdez.

En las zonas visitadas se tomaron cuatro puntos de referencia para el estudio ambiental. El primero fue el entable Teherán, donde se inició la actividad con muestras agua de tres pozos que alimentan el proceso de beneficio. En dicho entable no se almacenan relaves y todo su producto residual se dirige a un vertimiento caudaloso de notable envergadura, que también fue muestreado, y que desemboca en las aguas de la quebrada San Matías, donde, debido a esta influencia, se realizó muestreo de agua superficial y de sedimentos activos, tanto aguas arriba como aguas abajo de la actividad minera.



Fotografía 7.2. Agua de pozo Ismael. Fuente: autores.



Fotografía 7.3. Quebrada San Matías aguas arriba. Fuente: autores.



Fotografía 7.4. Vertimiento del entable Teherán. Fuente: autores.



Fotografía 7.5. Agua de pozo Miguel. Fuente: autores.

Como segundo punto de referencia se seleccionó el entable Pirita, donde se muestreó agua de un pozo de alimento utilizado en el proceso de beneficio, y que al final vierte el material residual en unas pocetas de tierra situadas dentro del mismo entable. El agua de dichas pocetas también se muestreó. Este sistema permite el escape de residuos hacia la quebrada San Matías, anteriormente muestreada.



Fotografía 7.6. Pozo de agua. Fuente: autores.



Fotografía 7.7. Entable Pirita. Fuente: autores.



Fotografía 7.8. Vertimiento del entable Pirita. Fuente: autores.



Fotografía 7.9. Vertimientos quebrada San Matías. Fuente: autores.

El tercer punto de referencia seleccionado fue el entable Buenos Aires, donde se recolectó la muestra de un vertimiento que se dirigía a la quebrada Buenos Aires en donde se recolectaron sedimentos activos y agua superficial antes y después de la actividad minera del entable.



El cuarto punto de referencia seleccionado fue la zona minera El Alacrán, donde se recolectó una muestra de los vertimientos que se dirigían a la quebrada Valdés, que también fue muestreada aguas arriba y aguas abajo de la actividad minera de dicha zona minera.



## 7.4. RESULTADOS DE ENSAYOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

El desarrollo de los ensayos químicos y ambientales mediante las metodologías instrumentales y analíticas aplicadas se enfoca en identificar la magnitud de las diferentes fuentes estudiadas, que afectan el equilibrio ambiental por las actividades de extracción metalúrgica llevadas a cabo en la zona de estudio. La finalidad con los resultados obtenidos es cuantificar los agentes contaminantes que aporta la actividad minera y proponer algunos mecanismos que faciliten la remediación, control y eliminación del efecto negativo en el medio ambiente.

### 7.4.1. DETERMINACIÓN DE PH

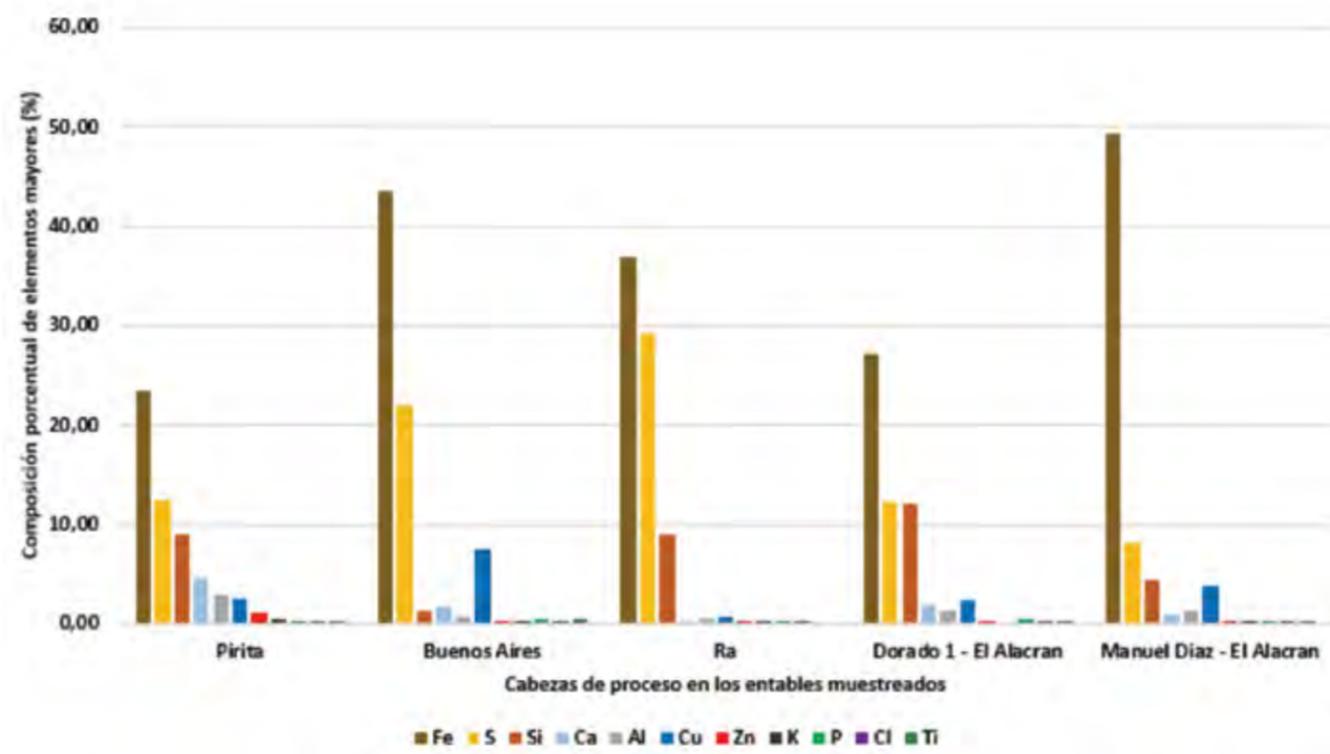
Figura 7.14. Valores de pH muestras líquidas tomadas in situ en el municipio de Puerto Libertador (Córdoba). Fuente: autores, 2019. Medición de pH Thermo Scientific Orion Star.

DESCRIPCIÓN	LOCALIZACIÓN	pH
Agua de pozo de alimentación Planta de Ismael 1	Mina y Planta Teherán	6,95
Agua de pozo de alimentación Planta de Ñaño 2	Mina y Planta Teherán	6,97
Agua de pozo de alimentación Planta de Miguel 3	Mina y Planta Teherán	6,81
Vertimiento del entable asociado a la mina Teherán hacia quebrada San Matías	Mina y Planta Teherán	6,26
Agua superficial asociada al sedimento activo aguas arriba de la actividad minera quebrada San Matías	Mina y Planta Teherán	7,55
Agua superficial asociada al sedimento activo aguas abajo de la actividad minera quebrada San Matías - después de la unión del vertimiento.	Mina y Planta Teherán	7,12
Agua directa de pozo que alimenta la entable de la mina Pirita	Entable Mina La Pirita	7,26
Vertimiento final del entable de la mina Pirita	Entable Mina La Pirita	5,06
Agua superficial asociada al sedimento activo aguas arriba de la actividad minera de la planta y mina Buenos Aires	Buenos Aires	7,60
Agua superficial asociada al sedimento activo aguas abajo de la actividad minera de la planta y mina Buenos Aires	Buenos Aires	6,46
Vertimiento entable Buenos Aires caída a la quebrada Buenos Aires	Buenos Aires	5,59
Agua superficial asociada al sedimento activo aguas abajo de actividad minera El Alacrán - quebrada Valdés	Quebrada Valdez	6,99
Vertimiento punto intermedio actividad minera sector El Alacrán	El Alacrán	7,64
Agua superficial asociada al sedimento activo aguas arriba de actividad minera El Alacrán - quebrada Valdés	Quebrada Valdez	7,64

La medición del pH in situ de las muestras tomadas de vertimientos, aguas de pozo y aguas superficiales asociadas a los sedimentos activos permite determinar la composición base de los minerales relacionados con los puntos de muestreo. Los valores de pH pueden encauzar la caracterización química y ambiental según la influencia de compuestos, tanto ácidos como alcalinos, a partir de lo cual es posible formarse un concepto sobre la calidad del agua. El valor límite permisible está entre las 6 y 9 unidades de pH.

El valor de pH en las muestras de aguas superficial tomadas nos facilita encauzar el estudio ambiental en la zona. Dicho valor pone en evidencia la presencia de compuestos que afectan la estabilidad del medio por la existencia de drenajes ácidos (ácido pH < 7 hasta 1 unidad de pH), la movilidad de metales o la presencia de compuestos altamente alcalinos (básico pH > 7 hasta 14 unidades de pH), ya sea por la formación mineralógica de la zona o por la actividad minera desarrollada. En general, el comportamiento de las muestras líquidas tomadas en las zonas de estudios en el municipio de Puerto Libertador osciló en un rango de 5,06 a 7,64 unidades de pH, con una tendencia ácida del 57%.

Figura 7.15. Composición de elementos mayores en el material de cabeza en el municipio de Puerto Libertador, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



## Análisis elemental mediante la técnica de fluorescencia de rayos x en material de cabeza

En el análisis de las muestras de cabeza de proceso metalúrgico se encontraron elementos mayores y menores que cada una de las muestras recolectadas; los resultados se encuentran en las figuras 7.15 y 7.16.

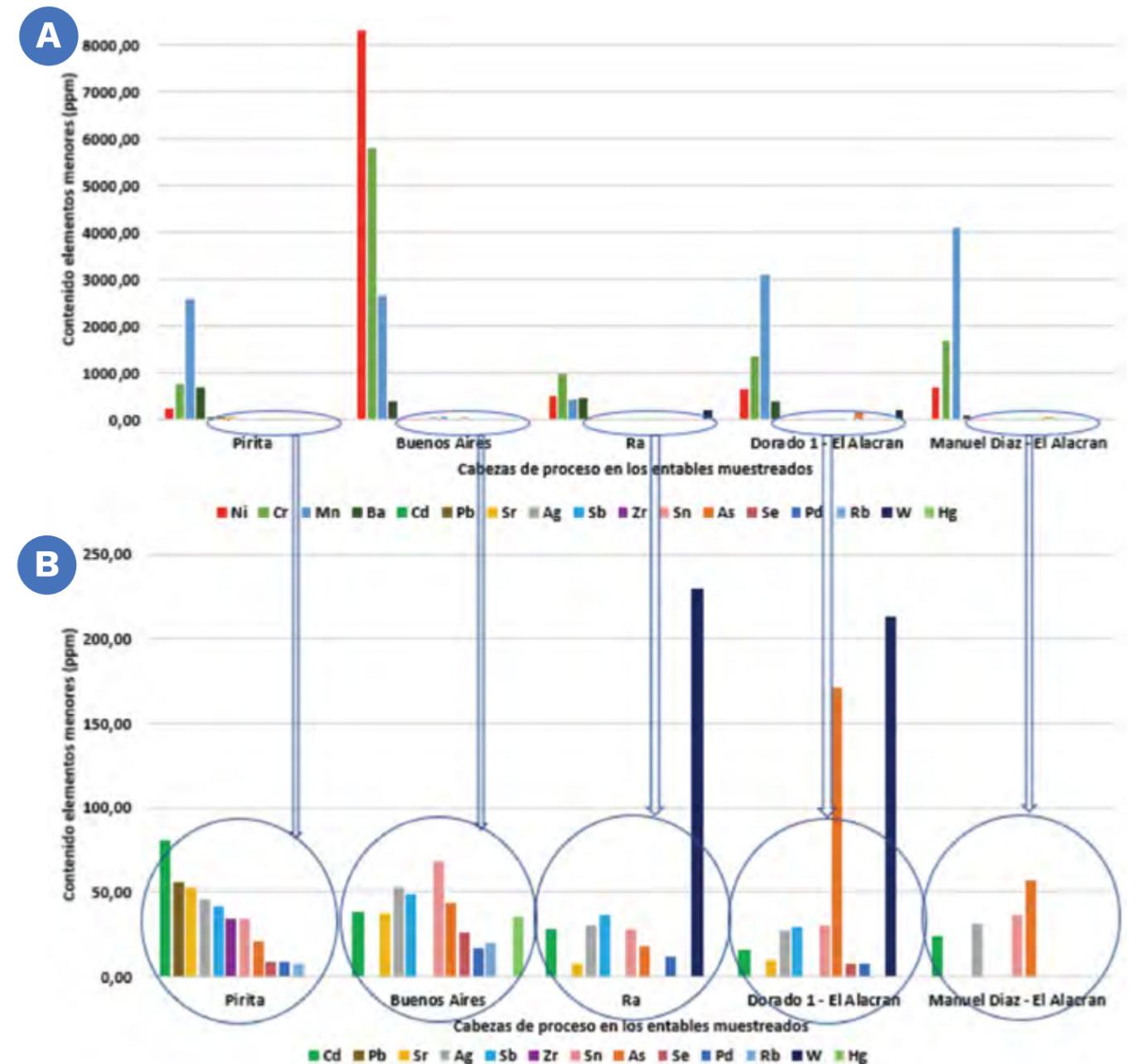
Los resultados del análisis elemental por la técnica de Fluorescencia de Rayos X para las muestras de cabeza de proceso del municipio de Puerto Libertador se presentaron permitieron dilucidar que el material de cabeza en todos los entables muestreados contiene como elementos predominantes Hierro y Azufre, que puede ser atribuido principalmente a la presencia de sulfuros de hierro, debido a que este material proviene principalmente de vetas de sulfuros masivos.

En el entable Pirita, el contenido de hierro y azufre se puede atribuir principalmente a la presencia de Pirita, que, de acuerdo con los resultados de petrografía (ubicar referencia cruzada), es la fase mineral más abundante presente, mientras que otros minerales contenedores de hierro y azufre presentes en proporciones menores en las muestras de este entable son la pirrotina, greigita y marcasita.

Además, como queda patente en los resultados, se observó que en el material de cabeza del entable Pirita un 2,48% corresponde a cobre, 12,46% a azufre y 23,40% a hierro. Sabiendo que la composición elemental de la calcopirita comprende 34,63% de cobre, 30,43% de hierro y 34,94% de azufre, si se le atribuye el contenido de cobre a dicho mineral como fase mayor, tal y como se evidenció en los resultados de petrografía, al 2,48% de Cu le correspondería el 2,50% de azufre como sulfuro.

De manera similar, en el entable Buenos Aires se encontró un contenido del 22,06% de azufre y 43,51% de hierro, y en el entable El Alacrán, 12,39% de azufre y 27,28% de hierro, mientras que en el entable de Raa se halló un 29,23% de azufre y 36,86% de hierro. Estos resultados permiten conjeturar un mayor contenido de sulfuros de hierro en las fases minerales de pirrotina, marcasita y pirita, sobre todo si se tienen en cuenta los resultados de petrografía de veta correspondientes a este último entable (véase petrografía de veta). Por otra parte, entre los elementos mayores detectados por FRX en el entable Pirita también se encuentran el cobre

Figura 7.16. Contenido (en partes por millón o gramos por tonelada) de elementos trazas A) mayoritarias y B) minoritarias, del material de cabeza en el municipio de Puerto Libertador determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



(2,48%) y el zinc (1,05%), que en correspondencia con el azufre, pueden relacionarse estrechamente con la presencia de calcopirita y esfalerita, tal y como lo evidencian los resultados de petrografía (ver resultados de petrografía); la asociación de estos sulfuros con la pirita es un indicio de que la clasificación de este último mineral puede ser 3B, que presenta bajos contenidos de As, Au, Ag y Pb como elementos traza (Cromie et al., 2018), tal y como se evidencia en los resultados del entable Pirita.

En el entable Buenos Aires también se logró detectar cobre como elemento mayor, con un contenido de 7,56%; en el entable de mina Raa apenas alcanza un 0,75%, y en El Alacrán, entre un 2,26 y 3,89%, que se pueden atribuir principalmente a la presencia de calcopirita y bornita (ver resultados de petrografía).

El silicio presente como elemento mayor se debe a que en las vetas de sulfuro masivo hay cuarzo, además de la posible presencia de aluminosilicatos, ya que también se logró detectar aluminio.

Otro de los elementos mayores que se destacan en el municipio de Puerto Libertador es el calcio, que puede deberse a la existencia de aluminosilicatos de calcio y carbonatos de calcio. Además, este elemento es un indicador de que hubo un proceso fuerte de mineralización. Sin embargo, cabe resaltar que en mina Pirita hay mayor cantidad de calcio (4,61%), mientras en Buenos Aires apenas alcanza un 1,65%, en mina Raa un 0,10% y en El Alacrán entre 0,93 y 1,90%, debido a la carbonatización de la roca hospedante.

Los restantes elementos mayores (potasio, fósforo, cloro y titanio) están presentes en el material de cabeza en cantidades que no superan el 1%. El contenido de potasio es un indicador de que posiblemente hay presencia de minerales de arcilla, como micas, que son ricas en potasio, y caolinitas, que son ricas en aluminio y derivan de la alteración de los feldespatos. El fósforo y cloro encontrados probablemente se deban a la presencia de apatita, lo que concordaría con los resultados de petrografía, mientras que el titanio normalmente se le atribuye a la roca hospedante, proveniente de magmas alcalinos ricos en titanio, que conducen a la formación de minerales como la titanomagnetita y la ilmenita.

La figura 7.16 muestra los resultados de análisis de elementos menores o trazas contenidos en el material de cabeza. De ellos se pudo deducir que en general el níquel, cromo, manganeso y bario son los elementos traza más representativos en Puerto Libertador, con mayor abundancia en el entable Buenos Aires, y son atribuibles a la presencia de estos elementos en las rocas hospedantes. También se encontró tungsteno en los entables Raa y El Alacrán, y arsénico en El Alacrán. Por debajo de 100 ppm se encontraron cadmio, estroncio, plata, antimonio, estaño y paladio en el material de cabeza de todos los entables muestreados. Por otra parte, el plomo únicamente se encontró en el material de cabeza del entable Pirita, con una posible relación con el contenido de esfalerita en ese mismo entable, y así como que el circonio se presentó en este entable, el selenio se presenta en todos los entables, exceptuando el de mina Raa, mientras el rubidio se halla en Buenos Aires y en Pirita, y mercurio solo en Buenos Aires.

El manganeso presente como elemento traza puede estar estrechamente relacionado con la presencia de óxidos de hierro  $Fe^{3+}$ , como en el caso de la hematita (véanse los resultados de petrografía) debido a que tanto el  $Mn^{3+}$ ,  $4+$  como el  $Fe^{3+}$  son iones ferromangánicos, por lo que en todos los entables muestreados en Puerto Libertador se aprecian contenidos de manganeso entre 2.500 ppm y 4.100 ppm, exceptuando el entable de la mina Raa, donde se evidenció un contenido de manganeso menor de 500 ppm, que posiblemente se deba al menor contenido de óxidos de hierro  $Fe^{3+}$  en comparación con el contenido de sulfuros de hierro  $Fe^{2+}$  (Railsback, 2012).

El Bario presente está relacionado con procesos hidrotermales tardíos que permiten la movilización de iones de calcio y bario y la precipitación de carbonatos.

Los elementos traza que se encontraron en una mínima cantidad, por debajo de los 55 ppm son cadmio, plomo, estroncio, plata, antimonio, circonio, estaño, arsénico, selenio, paladio, rubidio, tungsteno y mercurio.

## Caracterización de relaves

Los patios de relaves o depósitos de colas generalmente no están confinados y están expuestos a los fenómenos meteorológicos del ambiente, tales como la humedad, temperatura, oxidación y radiación solar. Estos factores inducen diversas reacciones químicas en el depósito, que generan, entre otras cosas, acidez, iones solubles tales como los sulfatos y los iones metálicos propios de cada mineral. Tanto la acidez como los metales producen un daño ambiental cuya magnitud depende del caso específico. Se recolectaron muestras de relaves expuestos en entables o plantas de beneficio del municipio de Puerto Libertador para realizar su respectiva caracterización química.

Se realizó análisis del contenido de elementos mayores y menores mediante la técnica de fluorescencia de rayos X con el objetivo de conocer principalmente las cantidades de materiales que podrían llegar a causar problemas de contaminación en caso de ser lixiviados por los mismos procesos ambientales a los que están expuestos.

Los resultados del análisis elemental por la técnica de fluorescencia de rayos X aplicada a las muestras de colas de proceso (relaves) en el municipio de Puerto Libertador se presentan en las figuras 7.17 y 7.18.

Figura 7.17. Determinación por la técnica de FRX de la Composición de elementos mayores de colas (relaves) en los entables muestreados en Puerto Libertador. Fuente: autores.

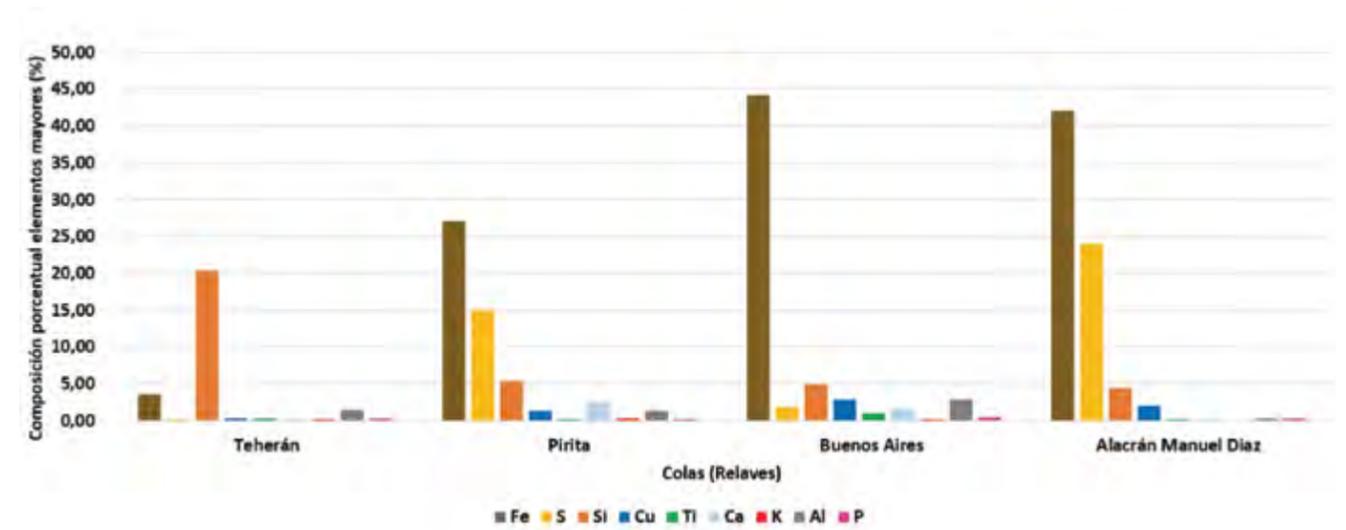
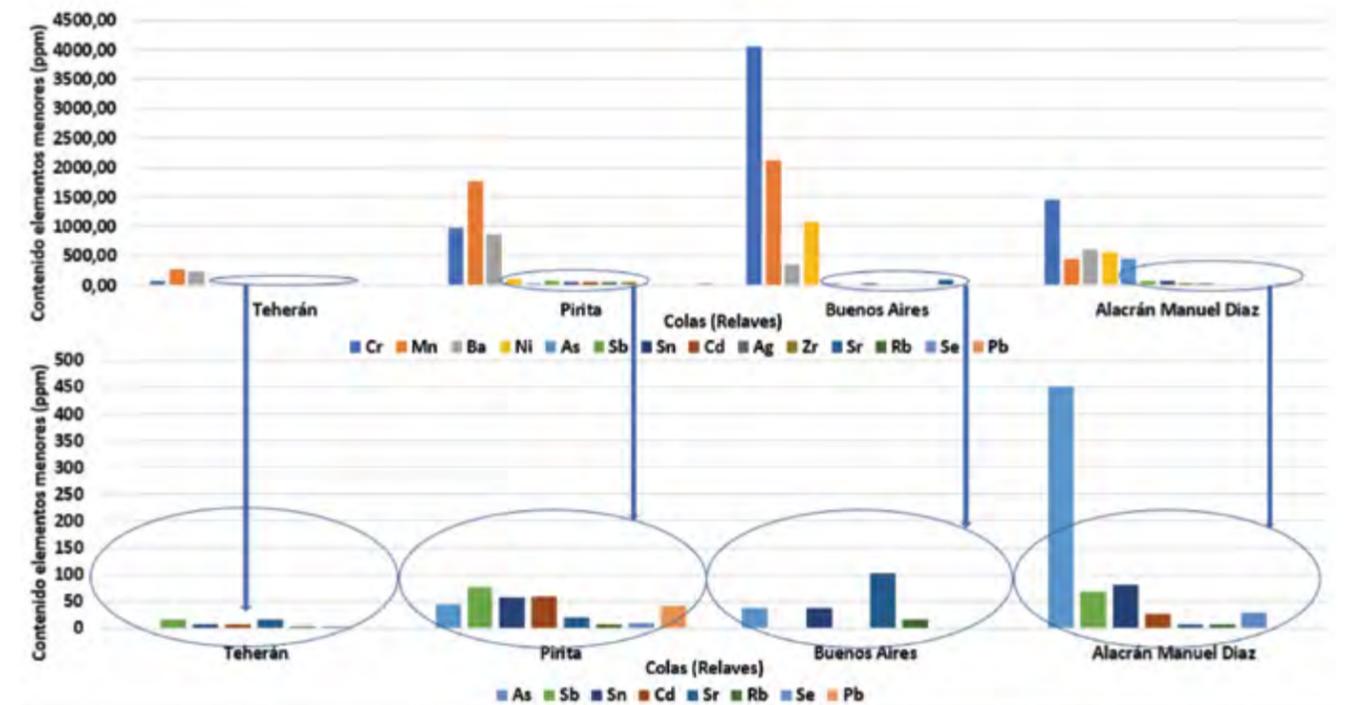


Figura 7.18. Determinación por la técnica de FRX de la Composición de elementos menores o trazas de colas (relaves) en los entables muestreados en Puerto Libertador. Fuente: autores.



El contenido de azufre encontrado en los relaves de Puerto Libertador arroja un 0,06% en el entable Teherán, 1,88% en el entable Buenos Aires, 15,05% en el entable Pirita y 23,94% en los entables de El Alacrán. Estos resultados concuerdan con los valores reportados sobre la composición del material de cabeza en la figura 7.15 y son determinantes para efectos ambientales, debido a que el azufre residual aportado por los procesos de minería en el municipio de Puerto Libertador pueden estar contribuyendo a la formación de drenajes ácidos por la oxidación de sulfuros finos catalizada por microorganismos como resultado de la exposición de los relaves al agua y al aire, o también por la presencia de sales contenedoras de azufre, pues los drenajes ácidos asociados a la minería se caracterizan por tener hidrógeno, iones metálicos y sulfatos (Çelebi, Öncel, y Kobya, 2018).

Por otro lado, uno de los elementos que más abundan en las colas o relaves del municipio de Puerto Libertador es el hierro, con un 3,52% en Teherán, 27,08% en Pirita, 44,08% en Buenos Aires y 42,04% en El Alacrán, y considerando que aquellos relaves con contenidos de hierro en la forma de sulfuro en ocasiones se encuentran asociado a metales pesados (Shahba, 2017), se debe hacer énfasis en los posibles metales pesados que pueden estar generando drenajes ácidos, como el cobre, que tal y como se observó en la figura 7.17, se encuentra presente como elemento mayor en los relaves de Puerto Libertador, con contenidos de 0,33% en Teherán, 1,28 en Pirita, 2,78% en Buenos Aires y 2,02% en El Alacrán, y que quizá provenga de minerales propios de la mena, como calcopirita y bornitas, tal y como se comentó en relación con el contenido elemental del material de cabeza.

Ahora, comparando el contenido de silicio con el contenido de hierro y azufre en los relaves de Puerto Libertador, se evidencia que en el material de cabeza el silicio se encuentra en menor proporción. Además, se nota un proceso en planta de beneficio que no es eficiente ni amigable con el medio ambiente, pues este comportamiento deja ver un posible contenido de una cantidad considerable de sulfuros de hierro que, en el caso de los relaves, generalmente es el más fino y, por ende, potencialmente reactivo a la oxidación, que generaría drenajes ácidos, por lo que se deben mejorar los procesos de beneficio en dichos entables o adecuar de mejor forma los sitios de almacenamiento de los relaves para que permitan mitigar la acumulación de estos elementos, de tal forma que se evite la posible movilidad de estos elementos o sustancias perjudiciales hacia las quebradas o ecosistemas aledaños a estos entables.

Por otra parte, se pudo observar que en los relaves se encuentra presente el aluminio como elemento mayor, que también puede ser un metal generador de drenaje ácido; sin embargo, estos relaves son contenedores de calcio como elemento mayor, lo que podría disminuir el impacto ambiental, debido a que este tipo de elemento es de carácter alcalino, por lo que tiende a formar compuestos que pueden ser neutralizadores naturales de ácidos.

En cuanto a los elementos menores, o elementos traza, contenidos en las colas de relaves (véase la figura 7.18) se encontraron algunos de los metales pesados que pueden generar drenajes ácidos (Shahba, 2017) o que por acumulación y persistencia, al tratarse de metales no biodegradables, pueden causar pérdidas de especies bacterianas responsables de los ciclos nutricionales en los ecosistemas (Fashola, Ngole-Jeme, y Babalola, 2016). En principio, en la figura 7.18 se aprecia un significativo contenido de cromo presente en los relaves de los entables Pirita, Buenos Aires y El Alacrán, por encima de las 900 ppm, proveniente del material de cabeza. El cromo figura entre los 126 contaminantes declarados prioritarios por la EPA de los EE. UU. (J. Yang, Yu, y Liu, 2017).

Otro de los metales pesados presentes en mayor cantidad como elemento traza es el bario, metal alcalino que se encuentra naturalmente en los suelos en concentraciones relativamente altas, aunque no hay evidencias contundentes de que este metal genere complicaciones de contaminación (Boechat, Carlos, Gianello, y de Oliveira Camargo, 2016).

Con respecto al arsénico, se aprecia en las colas de El Alacrán una cantidad cercana a las 450 ppm, que debe considerarse, puesto que este metal pesado es de los más perjudiciales para el medioambiente (Fashola et al., 2016).

Los demás elementos que se muestran en la figura 7.18, esto es, antimonio, estaño, cadmio, estroncio, rubidio, selenio y plomo, no muestran un contenido elevado (menos de 100 ppm), en comparación con los elementos anteriormente mencionados, y son propios de las minas muestreadas en Puerto Libertador. Sin embargo, estas minas presentan un contenido significativo de metales pesados, que, según se observa, están quedando depositados en los relaves, y que de no recibir el control apropiado, con el paso del tiempo podrían afectar intensamente el medio ambiente y la salud de las personas de la zona.

El análisis de mercurio realizado en el relave de Buenos Aires arrojó un valor de 0,275 mg/kg, que, de acuerdo con CCME (2002), determina que la presencia y la movilización de los metales pesados en el suelo dependen de las características del suelo y el pH. Para mercurio se muestra un rango de 1 a 1,5 mg/kg, lo que indica la posibilidad de que en la muestra del relave estudiado no se presente dicha movilidad.

## Pruebas ambientales

### Determinación de la Toxicidad por Lixiviación (TCLP - Toxicity Characteristics Leaching Procedure).

La prueba TCLP (*toxicity characteristics leaching procedure*) se realizó a una muestra de un relave de la planta Buenos Aires. A continuación se presentan la descripción de la muestra tomada y los resultados de la determinación de plata (Ag), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), metales pesados de interés ambiental que se encuentran en la lista de contaminantes tóxicos del Decreto 4741 de 2005. De acuerdo con esos resultados, los analitos cuantificados en la muestra del relave de Buenos Aires se encuentran en concentraciones no detectables por la técnica de absorción atómica llama, por lo que se concluye que no excede los límites máximos permisibles establecidos en la norma colombiana. El relave de Buenos Aires puede considerarse no peligroso, dado que no se detectaron los metales mencionados. A continuación, se presenta la determinación de metales pesados en el material de residuo del proceso de beneficio de la planta en cuestión.

Figura 7.19. Resultados de Metales Pesados en el relave municipio Puerto Libertador. Fuente: autores, 2018. EAA-Llama. Thermo Scientific iCe 3000 Series. GH- Fuente: SGC, (2018).

DESCRIPCIÓN	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cr (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Cd (mg/kg)	Ag (mg/kg)
Relave Buenos Aires	0,27	D.L.C.	17,79	15.854	D.L.C.	8,20

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

La determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica, de interés ambiental, dados los efectos que dichos elementos tienen sobre el medio ambiente y sobre la salud de las personas, permitió establecer las concentraciones de los metales y relacionarlos con las consecuencias asociadas a ellos. Se encontró una concentración de mercurio igual a 0,27 mg/kg, que, de acuerdo con Acosta (2007), no se considera tóxico para el desarrollo de fauna y flora. El cromo se presenta en una concentración de 17,79 mg/kg, lo cual indica que no presenta toxicidad, según el mismo autor.

Por su parte, el cromo se presenta en el relave en una concentración elevada, equivalente a 15.854 mg/kg, debido a la abundancia de calcopirita, que en la mena se encuentra en un 24%. El cobre puede interrumpir la actividad del suelo debido a que inhibe a microorganismos presentes en él; puede acumularse en plantas y animales y limita el crecimiento de algunas especies de plantas, por lo cual empobrece la diversidad de flora. Dada la acidez del relave analizado, allí el cobre es altamente tóxico.

En el caso de la plata, se presentó una concentración de 8,20 mg/kg, lo cual, según Kabata Pendias (2001), es una concentración tóxica para especies vegetales, dado que afecta sus funciones fisiológicas. Es posible que la presencia de los metales analizados en el relave no implique una lixiviación de los mismos, puesto que estos pueden quedar inmovilizados en las pilas de desechos.

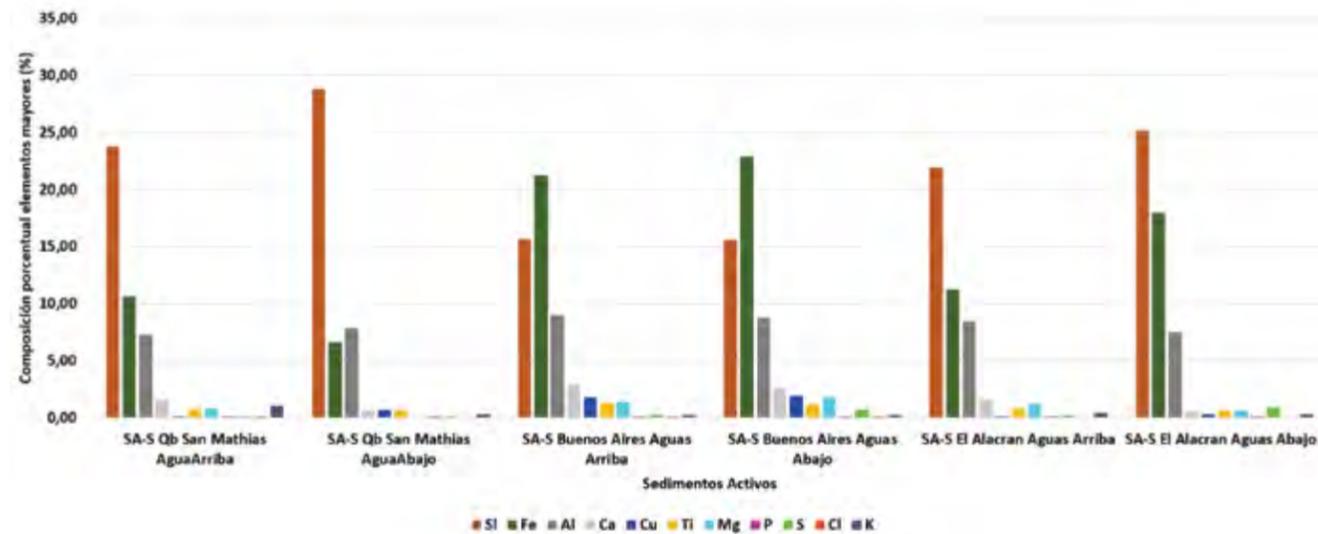
### Mercurio en aguas superficiales

Los resultados obtenidos respecto al mercurio en aguas superficiales indican que no hay presencia de este analito en las muestras recolectadas en las aguas de las quebradas San Matías, Buenos Aires y Valdés.

## 7.5. CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS ACTIVOS

Los resultados del análisis elemental, mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, realizado a las muestras de sedimentos activos del municipio de Puerto Libertador se presentan en la figura 7.20.

Figura 7.20. Composición de elementos mayores de los sedimentos activos en el municipio de Puerto Libertador, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



De acuerdo con los resultados obtenidos correspondientes a los sedimentos activos de la quebrada San Matías, se presentan principalmente contenidos de silicio, hierro y aluminio como elementos mayores, que se pueden relacionar con la presencia de silicatos y aluminosilicatos que normalmente están presentes en sedimentos activos, así como minerales de hierro, que en este caso son propios de la región. Otros elementos mayores detectados, aunque en baja proporción, pero no menos interesantes, son el calcio, cobre, titanio, magnesio, fósforo, azufre, cloro y potasio.

Estos resultados se encuentran dentro de los límites normales, y por lo tanto no se espera una generación de drenaje ácido, lo que concuerda con los resultados de del test ABA (véanse los resultados), que determinó que los relaves de los entables Teherán y Pirita asociados a la quebrada San Matías no son potencialmente ácidos. Además, como los contenidos de calcio y magnesio aguas arriba son de 0,80% y 1,52%, respectivamente, pueden contribuir a que no se aumente la acidez de la quebrada, por la naturaleza alcalina de estos elementos.

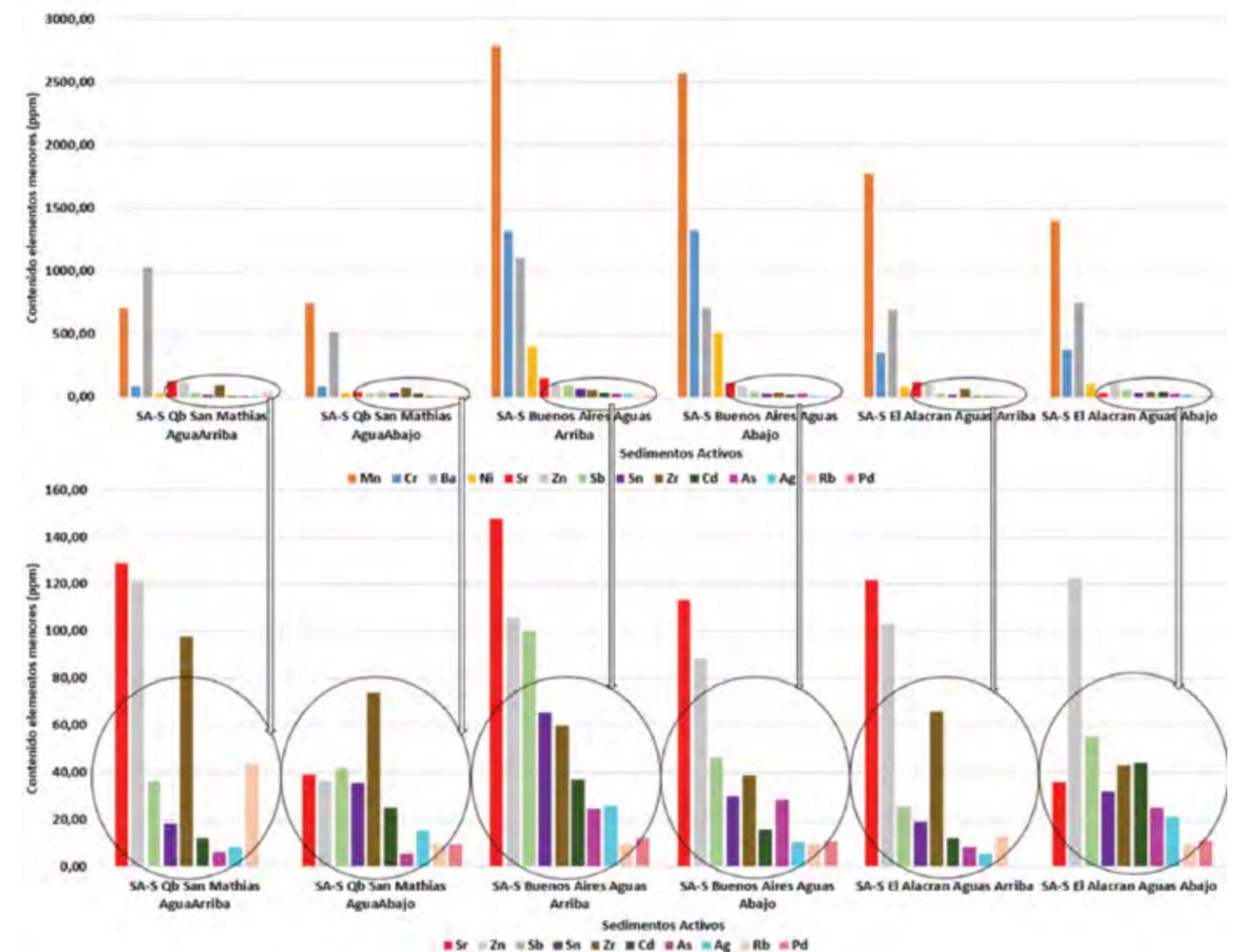
Además, debido a que en esta quebrada la técnica de FRX no revela la presencia de azufre en sus sedimentos activos, se puede decir que no se generan sulfatos que puedan formar ácido sulfúrico. Estos resultados se relacionan con los relaves de los entables Teherán y Pirita, de los cuales se determinó, mediante el test ABA (ver resultados), que no son potencialmente generadores de drenaje ácido, y estos resultados concuerdan con el pH reportado para el agua superficial asociada a este sedimento, que es de 7,12; no obstante, se les debe dar un mejor manejo a los vertimientos y relaves que se encuentran asociados a quebradas como la de San Matías, pues si se observa la composición porcentual de cobre en los sedimentos activos aguas abajo, que es de 0,68%, resulta evidente una acumulación de dicho metal pesado, como elemento mayor, que puede generar drenaje ácido y además eliminar microorganismos y bacterias benéficas para procesos de limpieza natural de los ecosistemas, lo que implicaría una disminución drástica del pH del medio circulante, que a su vez podría ocasionar destrucción de la flora, la fauna y el paisaje.

Por otra parte, con respecto a la quebrada Buenos Aires, también se aprecia el contenido de hierro, silicio y aluminio, principalmente, que, como se mencionó, son elementos que pueden ser encontrados normalmente en los sedimentos activos; sin embargo, en los sedimentos de esta quebrada se apreció una cantidad más abundante de cobre, que parece ser propia de la quebrada, pues su contenido es muy similar aguas arriba y aguas abajo de la actividad del entable Buenos Aires. En cuanto al contenido de azufre, se observó que en los sedimentos activos aguas abajo de la quebrada se incrementó hasta 0,67%, y que aguas arriba era de 0,25%, lo que puede ser atribuido al vertimiento residual del proceso en el entable, que no es controlado y permite la llegada hasta dicha quebrada. El inconveniente con este elemento (S), como ya se ha mencionado, es que al contacto con el agua y aire se oxida para formar sulfatos y, posteriormente, el respectivo ácido. De este modo se afecta el pH de la quebrada. En los resultados del test ABA (véanse los resultados) se diagnostica a los relaves del entable Buenos Aires como potencialmente margina de drenaje ácido. Ahora,

si se observan los resultados de pH en la quebrada aguas abajo (6,99), se nota que el pH es muy cercano a neutro, lo que puede explicarse por un contenido significativo de calcio y magnesio como elementos de naturaleza alcalina capaces de neutralizar medios ácidos. Sin embargo, dada la falta de control en los relaves potencialmente ácidos, con el transcurrir del tiempo dichos relaves pueden acumular mayor cantidad de elementos generadores de drenaje ácido y desbalancear el equilibrio que hasta el momento se presenta en esta quebrada, de tal modo que elementos como el azufre y metales pesados como el cobre podrían incrementarse por encima de la cantidad de calcio y magnesio, lo que conduciría a una disminución del pH y a un aumento de la acidez de la quebrada.

Por último, en la quebrada Valdez se observa un comportamiento similar al de la quebrada Buenos Aires. Sin embargo, en la quebrada Valdez el contenido de calcio y magnesio es menor en comparación con el de la quebrada Buenos Aires, y aún más en los sedimentos activos aguas abajo, lo que deja ver que en la quebrada Valdez los vertimientos que llegan desde los relaves están comenzando a afectarla. Además, por los resultados del test ABA (véanse los resultados) se determinó que estos relaves son de un potencial ácido alto, por lo que es recomendable que en El Alacrán se lleven a cabo acciones para mejorar el control de relaves y vertimientos.

Figura 7.21. Contenido (en partes por millón) de elementos menores o trazas de los sedimentos activos, determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



En cuanto al contenido de los elementos menores presentes en los sedimentos activos de las quebradas muestreadas en el municipio de Puerto Libertador, se encontraron metales pesados en mayor abundancia, como manganeso, cromo y bario, mientras que el níquel solo se encuentra en mayor abundancia, en com-

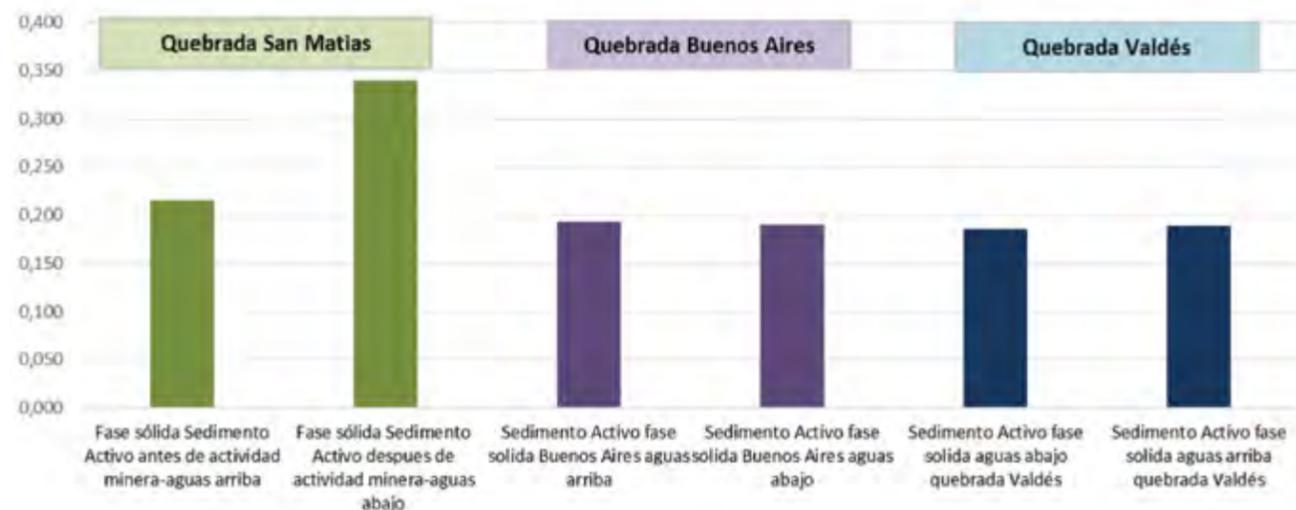
paración con las otras dos quebradas analizadas, en los sedimentos activos de la quebrada Buenos Aires; los demás elementos menores (Sr, Zn, Sb, Sn, Zr, Cd, As, Ag, Rb y Pd), presentes como elementos traza, se encuentran en menor abundancia.

Debido a que los sedimentos activos de las quebradas analizadas aguas arriba de la actividad minera presentan una similar o mayor cantidad de elementos traza en comparación con los sedimentos activos aguas abajo de la actividad minera, se puede decir que dichos elementos en los sedimentos activos de Puerto Libertador son de origen geogénico, lo que quiere decir que son característicos de las zonas de estudio en Puerto Libertador.

En lo que respecta al contenido de cromo presente como elemento traza determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X, se aprecia que aguas abajo de la quebrada San Matías hay 87,52 ppm, aguas abajo de la quebrada Buenos Aires hay 1.324,30 ppm, y aguas abajo de la quebrada Valdez hay 374,20 ppm. Estos valores representan un alto contenido de cromo, principalmente en la quebrada Buenos Aires. Sin embargo, se debe considerar que la presencia de otros minerales, como óxidos de hierro, inmoviliza el cromo y le da carácter de cromo trivalente no tóxico (Lilli, Nikolaidis, Moraetis, Kalogerakis, y Karatzas, 2014). Mientras que el cromo detectado por FRX muestra un contenido de por debajo de las 800 ppm en la quebrada San Matías, 2800 ppm en la quebrada Buenos Aires, y 1800 ppm en la quebrada Valdez; son niveles elevados de este metal pesado, que puede llegar a ser perjudicial para la comunidad cercana que está en contacto con estas fuentes de agua, sobre todo en caso de que el manganeso lograra disolverse en el agua de dichas quebradas (González-Merizalde et al., 2016). Sin embargo, como se mencionó, los metales pesados detectados mediante FRX tienen un posible origen geogénico; de ser así, no podrían atribuirse a los trabajos de minería en Puerto Libertador.

## Mercurio en sedimentos activos

Figura 7.22. Determinación de mercurio en sedimentos activos en mg/Kg. Fuente: autores.



En los puntos de muestreo seleccionados de las quebradas de la zona en Puerto Libertador se observó un rango de concentración de magnitud similar en los puntos iniciales y finales. Solo en la quebrada San Matías, que recibe la corriente de vertimiento del entable Teherán, se observa un aumento de 0,124 mg/kg. En las muestras líquidas de aguas superficiales no se detectó el analito. En el análisis de mercurio en fase sólida de los sedimentos activos muestreados se encontraron valores representativos en todos los puntos cuantificados. Dado que en Colombia no existe reglamentación de los niveles máximos permisibles de metales pesados en sedimentos activos ni en suelo, en general, los resultados obtenidos se compararon con la legislación canadiense, que establece que un sedimento activo es de calidad apropiada cuando la concentración de mercurio es de 0,17 mg/kg. Según Kabata (2001), una concentración de mercurio entre 1-3 mg/L es tóxico para la flora y fauna, debido a que altera las funciones metabólicas de las plantas, por lo cual los sedimentos muestreados tienen probabilidad de ser tóxicos para las especies vivas en el medio.

NOAA (2008) presenta valores de referencia de concentración de efecto umbral de mercurio (TEC, por sus siglas en inglés: *threshold effect concentration*) en organismos (180 µg/kg). La TEC se define como la concentra-

ción que no debería tener efectos dañinos en los microorganismos que viven en contacto con el sedimento. Dada esta recomendación, se puede decir que es probable que los organismos presentes en las quebradas de donde se extrajeron los sedimentos activos estén siendo afectados por las concentraciones elevadas de mercurio determinadas en laboratorio.

## Vertimientos en la zona

En el análisis químico de los vertimientos, para mercurio no se obtuvieron concentraciones de este analito en las muestras líquidas de los entables Teherán y El Alacrán. En cambio, de la fase sólida se obtuvieron valores de 0,258 y 0,237 mg/kg en Teherán y Pirita, respectivamente. Se realizó análisis de plata, cobre, hierro, zinc, plomo, cadmio, cromo y níquel en esas mismas muestras con el propósito de identificar posibles elementos que pudieran mobilizarse a la fuente hídrica cercana. En la tabla XX se presentan los resultados:

Figura 7.23. Análisis de metales en vertimientos. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	Ag (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Ni (mg/L)
Vertimiento líquido del entable asociado Teherán	N.D.	0.10	0.17	0.46	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vertimiento final del entable La Pirita	N.D.	1.42	146.5	0.49	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vertimiento entable Buenos Aires, caída a quebrada	N.D.	26.68	6.62	0.62	N.D.	N.D.	N.D.	2.77
Vertimiento intermedio entre el Alacrán y comunidad	N.D.	3.41	0.48	0.37	0.38	N.D.	N.D.	N.D.

En la Resolución 631 de 2015 se expresan los valores de los parámetros de vertimientos producto del proceso industrial de extracción de oro y otros metales preciosos.

Revisando los valores obtenidos a partir de las muestras de Puerto Libertador se pueden observar concentraciones por encima de la norma de cobre, hierro y níquel en los vertimientos de Pirita, Buenos Aires y El Alacrán, respectivamente. De los analitos analizados de zinc, cadmio y cromo no se obtuvieron concentraciones.

De igual manera, se determinó la presencia de cianuro libre y complejo por volumetría y por ion selectivo en las muestras en los cuales no se detectó.

Figura 7.24. Valores de vertimiento en la extracción de oro. Fuente: autores.

ELEMENTO	EXTRACCIÓN DE ORO mg/L
Cianuro total (CN <sup>-</sup> )	1.00
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	250.00
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	1.200.00
Sulfuros (S <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	1.00
Arsénico (As)	0.10
Cadmio (Cd)	0.05
Zinc (Zn)	3.00
Cobre (Cu)	1.00
Cromo (Cr)	0.50
Hierro (Fe)	2.00
Mercurio (Hg)	0.002
Níquel (Ni)	0.50
Plata (Ag)	
Plomo (Pb)	0.20

## 7.6. BALANCE ACIDO-BASE (TEST ABA) PARA LA DETERMINACIÓN DEL DRENAJE ACIDO DE MINAS (DAM)

En la caracterización química ambiental se determinó la capacidad de generación de drenaje ácido de los relaves pertenecientes a las diferentes plantas de beneficio que fueron visitadas en el distrito minero de Puerto Libertador. En la figura 7.25 se consignan la descripción de las muestras y el valor de pH inicial de cada una medida en el laboratorio.

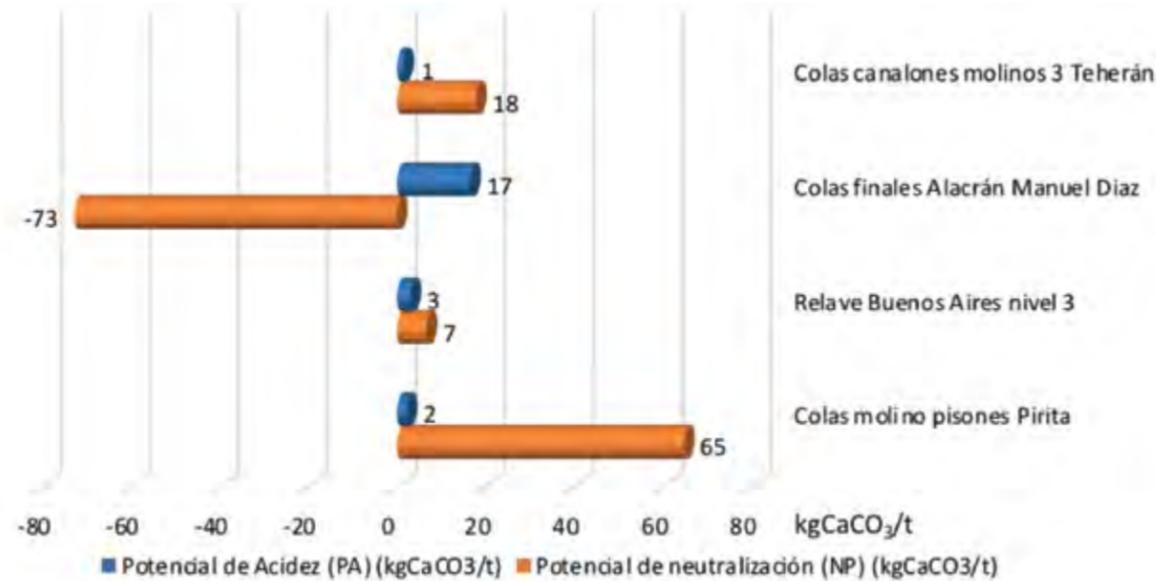
De los resultados presentados en la figura 7.26, se infiere la presencia de cantidades apreciables de sulfuros polimetálicos que se asocian con el potencial de acidez de las muestras tomadas, y sustancias químicas que les confieren a las mismas la capacidad de neutralizar las sustancias ácidas formadas, debido a la

solubilización de metales contenidos en las rocas y el drenaje a fuentes hídricas cercanas. Como consecuencia de ello, dichas fuentes resultan contaminadas por la acumulación de metales pesados y por el pH bajo. Los resultados obtenidos están relacionados con los reportes de fluorescencia de rayos X (FRX) de cabezas de proceso y materiales producidos luego del beneficio del oro, que, para los mineros, no representa una ganancia económica.

Figura 7.25. Muestras de relaves de las plantas de beneficio del municipio de Puerto Libertador. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	pH EN LABORATORIO
Colas molino pisonos Pirita	7,99
Relave Buenos Aires nivel 3	4,72
Colas finales Alacrán Manuel Díaz	1,76
Colas canalones molinos 3 Teherán	7,67

Figura 7.26. Resultados de aplicación de Test ABA modificado. Fuente: autores.



Dado el resultado del potencial de acidez y el de neutralización de colas finales de Alacrán Manuel Díaz, se tiene un potencial neto de neutralización, que indica que el balance de acidez-basicidad es inferior a 20 kgCaCO<sub>3</sub>/t, y hay una relación de estos inferior a tres, lo cual indica que las muestras tienen baja capacidad de neutralización de acidez. Así, se espera que, debido a la exposición ambiental de los minerales presentes en los relaves, se genere drenaje ácido de minas.

Los resultados del test ABA indican que las muestras de relaves tomadas en las plantas de beneficio de oro de Pirita y Teherán presentan un bajo potencial de generación de drenaje ácido de minas, por lo que en este caso se reduce la posibilidad de lixiviación de metales pesados en el ambiente, cuya presencia representaría un riesgo para la salud humana y el ecosistema.

En el caso del relave de Buenos Aires, la relación entre el potencial de neutralización y de acidez es de 2,69, y el potencial neto de neutralización es < 20 kgCaCO<sub>3</sub>/t, lo que indica que su potencial de generación de DAM es incierto, pues existe un potencial de neutralización y de acidez semejante que, según los resultados del test ABA modificado, no da certeza de generación del DAM. Este resultado está relacionado con la presencia de carbonatos de calcio que reaccionan con el ácido generado por los sulfuros polimetálicos y neutraliza en cierto grado la acidez del medio; sin embargo, no se descarta la posibilidad de que se generen bajos niveles de pH en el agua que fluye en el medio. Para este caso es recomendable usar test dinámicos con los que pueda llegarse a un resultado más claro.

Es posible establecer una relación entre el pH de la pasta de las muestras y los resultados arrojados por el test ABA. La determinación pH de las plantas Pirita (7,99 unidades) y Teherán (7,67 unidades) permite concluir que se trata de pH alcalinos, lo cual reduce la posibilidad de generación de DAM. En el caso del relave de Buenos Aires, cuyo pH de pasta es de 4,72 unidades, la predicción del DAM se torna compleja debido a que la acidez no es tan elevada como sí lo es en el relave de la planta Alacrán Manuel Díaz, que es fuertemente ácido, dado que se determinó un pH igual a 1,76 unidades, de manera que es muy probable que los sulfuros polimetálicos presentes, al entrar en contacto con el oxígeno, se oxiden, y debido a las precipitaciones generen ácido que drenaría a las fuentes de agua cercanas, lo que afectaría a la flora, fauna, el paisaje y el suelo.

Figura 7.27. Mapa de ubicaciones de muestras y resultados relevantes Teherán Pirita. Fuente: autores.

SA-S: sedimento activo fase sólida SA-L: sedimento activo fase líquida REL: relave VER: vertimiento ANQ: agua natural quebrada AN: agua nacimiento

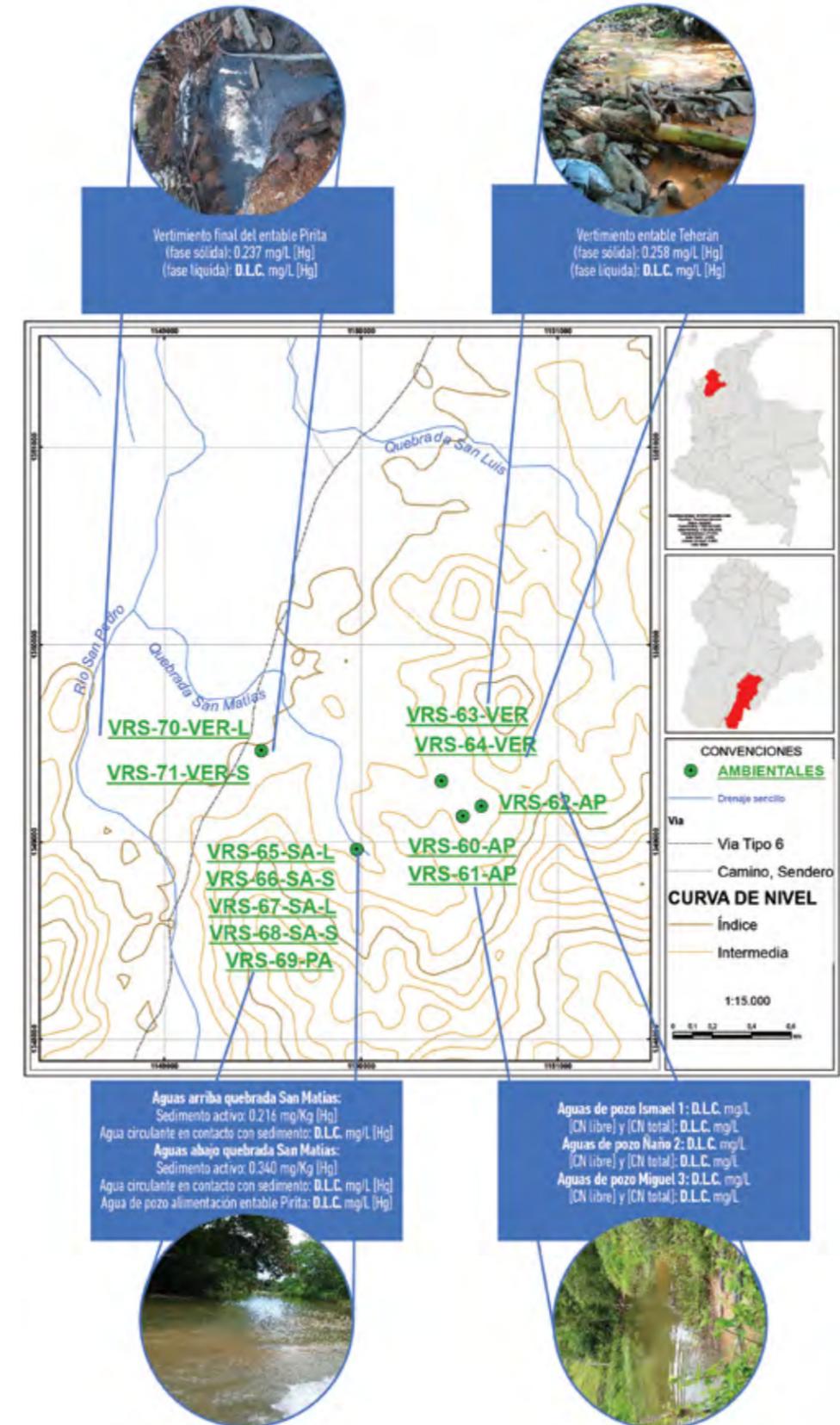


Figura 7.28. Mapa de ubicaciones de muestras y resultados relevantes Buenos Aires. Fuente: autores.  
**SA-S:** sedimento activo fase sólida **SA-L:** sedimento activo fase líquida **REL:** relave **VER:** vertimiento **ANQ:** agua natural quebrada **AN:** agua nacimiento

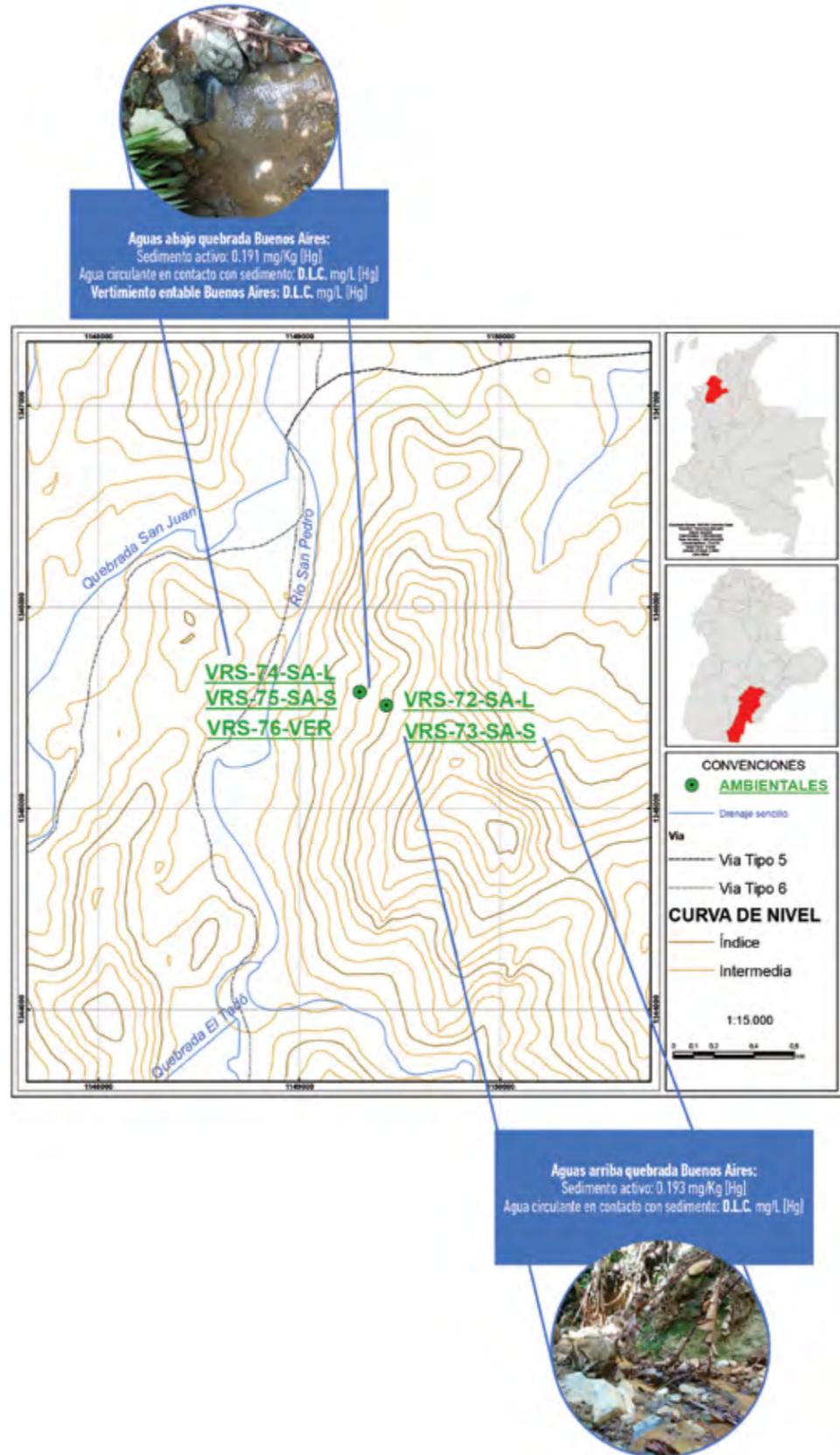
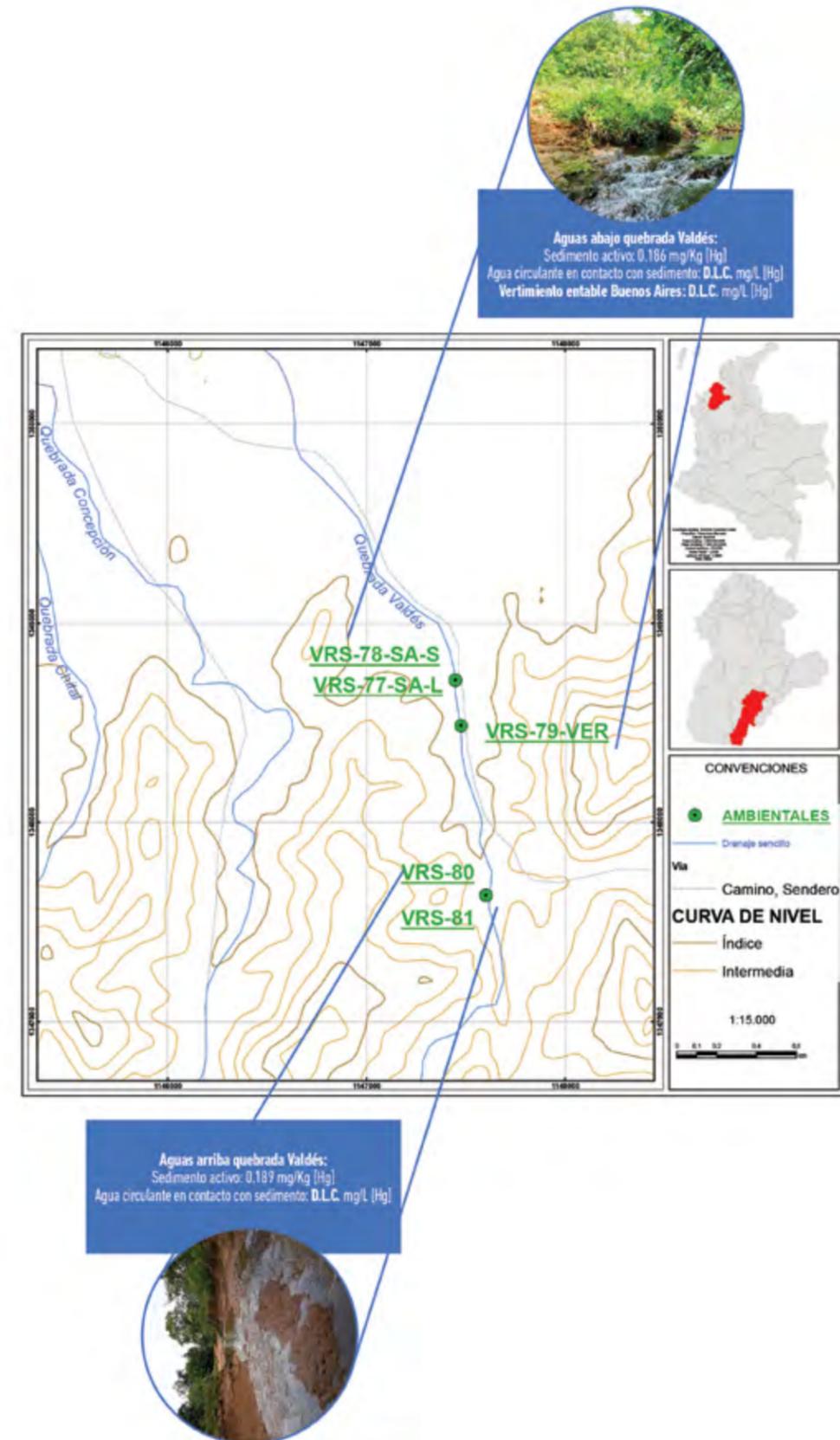


Figura 7.29. Mapa de ubicaciones de muestras y resultados relevantes Buenos Aires. Fuente: autores.  
**SA-S:** sedimento activo fase sólida **SA-L:** sedimento activo fase líquida **REL:** relave **VER:** vertimiento **ANQ:** agua natural quebrada **AN:** agua nacimiento



## 7.7. CONCLUSIONES QUÍMICAS Y AMBIENTALES

- Los resultados de fluorescencia de rayos X para el material de cabeza concuerdan con los resultados de petrografía, evidenciando principalmente el contenido de Hierro y Azufre en los entables del municipio de Puerto Libertador.
- De acuerdo con los resultados de FRX para el material de cabeza, en el municipio de Puerto Libertador se reporta un contenido alto de cobre, hasta 7,56%, así como también se logró determinar la presencia de metales traza, como cromo, níquel y manganeso.
- El entable Buenos Aires presenta una diferencia marcada con respecto a los demás entables, en cuanto a que contiene una mayor cantidad de cobre, níquel y cromo en el material de cabeza, lo que se refleja en sus relaves.
- Por fluorescencia de rayos X se evidencian elevados contenidos de los elementos traza, (Cr, Mn, Ni y Cu) en los relaves y sedimentos activos del municipio de Puerto Libertador, los cuales deben ser monitoreados por prevención de alteraciones que generen iones perjudiciales para el medio ambiente, la salud humana y para la región.
- En general el comportamiento de las muestras líquidas tomadas en las zonas de estudios en el municipio de Puerto Libertador oscilaron en un rango de 5,06 a 7,64 unidades de pH, presentándose una tendencia levemente ácida del 57%.
- Los resultados obtenidos para mercurio en aguas superficiales indican que no hay presencia de este en las muestras recolectadas de las aguas de las quebradas San Matías, Buenos Aires y Valdés.
- En el análisis químico de la fase líquida en los vertimientos de Teherán y el Alacrán no hay presencia de mercurio; sin embargo el estudio para la fase sólida de los vertimientos de Teherán y Pirita, permitió identificar presencia de 0.258 mg/Kg y 0.237 mg/Kg de mercurio respectivamente, lo cual concluye que puede existir movilidad del metal pesado hacia las quebrada San Matías.
- En las quebradas seleccionadas en la zona de Puerto Libertador se observó un rango de concentración de mercurio similar aguas arriba y aguas abajo. Solo para la quebrada San Matías, que recibe la corriente de los vertimientos de Teherán y Pirita, se observa un aumento de 0.124 mg/Kg.
- A partir de los resultados obtenidos de los ensayos químicos ambientales, se puede concluir que la generación de drenaje ácido de minas es un pasivo ambiental de gran importancia dado que existe, un potencial de acidez elevado aportado por los sulfuros polimetálicos presentes en el relave de la planta El

---

**A partir de los resultados obtenidos de los ensayos químicos ambientales, se puede concluir que la generación de drenaje ácido de minas es un pasivo ambiental de gran importancia dado que existe, un potencial de acidez elevado aportado por los sulfuros polimetálicos presentes en el relave de la planta El Alacrán, que sufren procesos de oxidación y posterior formación de ácido sulfúrico, que modifica el pH natural de las fuentes de agua a las cuáles drena y afecta la fauna, la flora y el paisaje. Por su parte, los relaves de Pirita y Teherán presentan baja capacidad de generación de DAM lo cual se relaciona con los pH de pastas cercanos a la alcalinidad. Para el caso del relave de Buenos Aires, se obtuvo una incertidumbre en la generación de drenaje ácido, por lo que es necesario realizar otro tipo de ensayos que brinden mayor información sobre su capacidad de neutralización de acidez.**

---

Alacrán, que sufren procesos de oxidación y posterior formación de ácido sulfúrico, que modifica el pH natural de las fuentes de agua a las cuáles drena y afecta la fauna, la flora y el paisaje. Por su parte, los relaves de Pirita y Teherán presentan baja capacidad de generación de DAM lo cual se relaciona con los pH de pastas cercanos a la alcalinidad. Para el caso del relave de Buenos Aires, se obtuvo una incertidumbre en la generación de drenaje ácido, por lo que es necesario realizar otro tipo de ensayos que brinden mayor información sobre su capacidad de neutralización de acidez.

- El contacto directo de los relaves con agentes ambientales como el agua, proveniente de las precipitaciones, facilita la movilidad de los materiales de desecho del proceso de beneficio del oro y debido a ello, y a la luz de la normatividad colombiana, se pueden categorizar como materiales peligrosos por su nivel de toxicidad, puesto que tienen la capacidad de provocar efectos biológicos indeseables o adversos a la salud humana y al ambiente. En este sentido, al realizar la prueba de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) no se detectaron metales de interés ambiental como plomo, cadmio, cromo, plata y mercurio en el relave de Buenos Aires, por lo que no se catalogan como peligrosos según el Decreto 4741 de 2005.

---

**Dadas las condiciones en las cuales se encuentran los depósitos de relaves del proceso de beneficio del oro, se recomienda realizar una adecuación del espacio cubriendo las canchas de relaves e impermeabilizando el fondo del depósito con geomembranas impermeables para disminuir la exposición de los minerales presentes a fenómenos ambientales como las precipitaciones y a fenómenos de meteorización que promueven la generación de drenaje ácido de mina y la movilidad de metales pesados que pueden contaminar las fuentes hídricas cercanas.**

---

## 7.8. RECOMENDACIÓN

- Dadas las condiciones en las cuales se encuentran los depósitos de relaves del proceso de beneficio del oro, se recomienda realizar una adecuación del espacio cubriendo las canchas de relaves e impermeabilizando el fondo del depósito con geomembranas impermeables para disminuir la exposición de los minerales presentes a fenómenos ambientales como las precipitaciones y a fenómenos de meteorización que promueven la generación de drenaje ácido de mina y la movilidad de metales pesados que pueden contaminar las fuentes hídricas cercanas.

## 8. RUTA METALÚRGICA PROPUESTA PARA LA ZONA MINERA

Luego de realizar el recorrido por los aspectos relevantes que deben tenerse en cuenta en el proceso de beneficio de oro, en este capítulo se presenta la propuesta de ruta metalúrgica adecuada para aplicar en la zona minera, propuesta desarrollada de acuerdo con las características geológicas y mineralógicas, pruebas metalúrgicas y la caracterización físico-química de relaves.

---

Trabajo en el molino de pisones. Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano



# 8.1. PROCESO DE BENEFICIO DESARROLLADO ACTUALMENTE

## 8.1.1. PLANTA DE BENEFICIO DE LA MINA PIRITA

La mina Pirita tiene una sola planta de beneficio, en la que se utiliza un molino de pisonos californiano para la trituration y molienda primaria, seguido de un canalón para retener el mineral molido con mayor peso específico, y un canalón (matraca) utilizado para la refinación de los medios del primer canalón. Los medios y colas de la primera refinación son llevados a molienda secundaria, que se realiza en un molino de bolas, y el producto es refinado de nuevo en la matraca para finalmente obtener un “superconcentrado”.

El concentrado final es llevado a un tratamiento con ácido nítrico para después ser fundido directamente en una cuchara refractaria, con bórax como fundente, usando un sistema de soplete con gas propano y oxígeno. El diagrama de flujo del proceso de beneficio de la mina Pirita se muestra en la figura 8.1.

La siguiente tabla muestra la relación de equipos que se encuentran en la planta de la mina Pirita, y especifica algunas características, como potencia de los motores, dimensiones, velocidades de rotación, caudal de pulpa de producto (capacidad) y porcentaje de sólidos del producto.

Figura 8.1. Diagrama de beneficio actual mina Pirita. Fuente: autores.

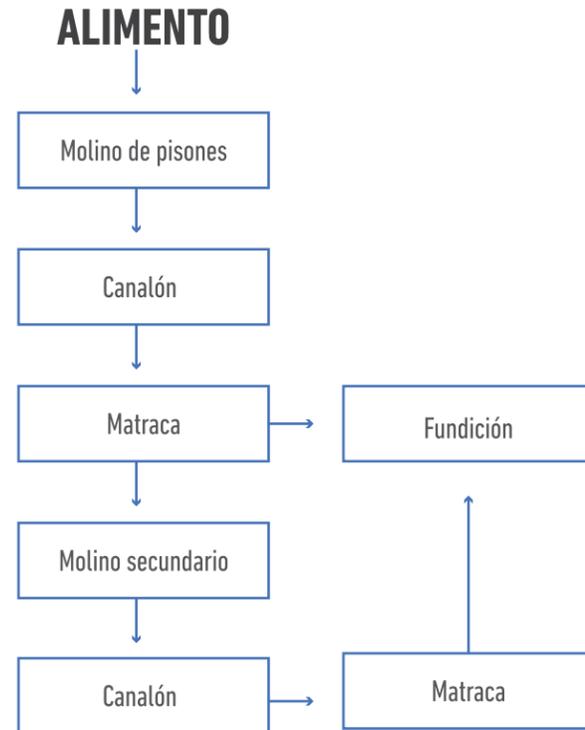


Figura 8.2. Descripción de los equipos de los entables de la mina Pirita. Fuente: autores.

EQUIPO	# DE EQUIPOS	CARACTERÍSTICAS
Molino de pisonos	1	Número de pisonos: 3 Diámetro de la polea principal: 1,2 m Velocidad rotacional de la polea principal: 45 rpm Potencia nominal: 7,5 hp Longitud del canalón de producto: 1,5 m Caudal de pulpa de producto: 3,2 m³/h Porcentaje de sólidos del producto: 36,7%
Molino de bolas	1	Diámetro x longitud: 1,0 x 1,2 m Potencia nominal: 12,0 hp
Canalón para refinación (Matraca)	1	Ancho x longitud: 0,3 x 2,5 m Ángulo de inclinación: 11,2°

Finalmente, se observan fotografías del molino de pisonos y del molino de bolas de la planta de la mina Pirita donde fueron colectadas las muestras, y en las fotografías 8.3 y 8.4 se observan los sistemas de concentración y refinación de concentrados que usan matraca y del sistema de fundición que se vale de cuchara refractaria y soplete.



Fotografía 8.1. Molino de bolas. Fuente: autores.



Fotografía 8.2. Molino de pisonos. Fuente: autores.



Fotografía 8.3. Sistema de concentración y refinación en matraca. Fuente: autores.



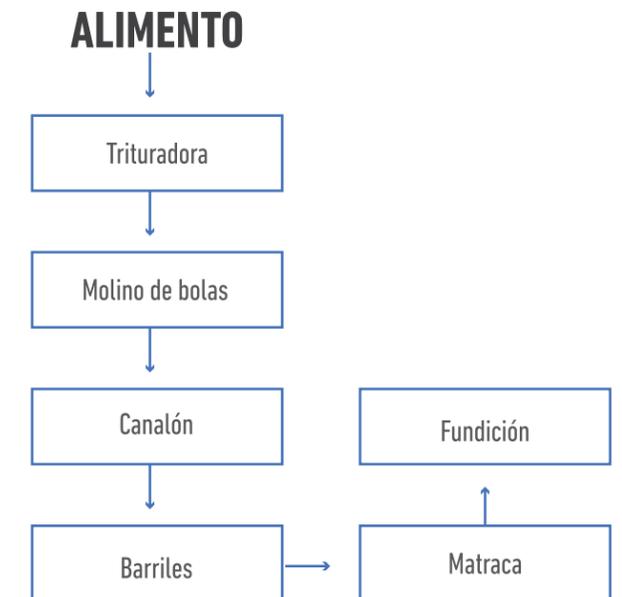
Fotografía 8.4. Cuchara refractaria y concentrado para fundición. Fuente: autores.

## 8.1.2. PLANTAS DE BENEFICIO DE LA MINA EL ALACRÁN

En la mina El Alacrán se encuentran entre veinticinco y veintiocho entables, que utilizan dos rutas diferentes de procesamiento, dependiendo del tipo de mineral alimentado a la planta (mineral meteorizado o superficial o mineral de veta competente). En el presente estudio fueron muestreados los entables de Manuel Díaz y El Alacrán Dorado, los cuales procesan mineral de veta competente que presenta alta resistencia a la conminución y tamaños de partícula gruesos. Para la trituration se utilizan trituradoras de quijadas; para la molienda primaria se utilizan molinos de bolas, y para la molienda secundaria, barriles con bolas denominados cocos. A los molinos de bolas siguen canalones para retener el mineral molido con mayor peso específico y canalones (matracas) para refinación.

A continuación muestra la relación de equipos que se encuentran en los entables. Se especifican algunas características, como potencia de los motores, dimensiones, velocidades de rotación, caudal de pulpa de producto (capacidad) y porcentaje de sólidos del producto.

Figura 8.3. Diagrama de beneficio actual mina El Alacrán. Fuente: autores.



Finalmente, en las fotografías se muestran los equipos que se encuentran instalados en los entables de Manuel Díaz y El Alacrán Dorado.

Figura 8.4. Descripción de los equipos de los entables de la mina El Alacrán. Fuente: autores.

EQUIPO	# DE EQUIPOS	CARACTERÍSTICAS
Trituradora de mandíbulas	1	Abertura: 0,15 m Potencia nominal: 7,5 hp
Molino de bolas	1	Diámetro x longitud: 1,0 x 1,2 m Potencia nominal: 7,8 hp Tamaño máximo de bola (cuerpos molidores irregulares): 2- 3 pulgadas Longitud del canalón de producto: 1,5 m Inclinación del canalón de producto: 11,9° Caudal de pulpa de producto: 1 m³/h Porcentaje de sólidos del producto: 60%
Barriles	3	Diámetro x longitud: 0,5 x 0,5 m Potencia nominal: 12,0 hp
Canalón para refinación (Matraca)	1	Ancho x longitud: 0,3 x 1,7 m Ángulo de inclinación: 0,7°



Fotografía 8.5. Trituradora de mandíbulas. Fuente: autores.



Fotografía 8.6. Molino de bolas. Fuente: autores.



Fotografía 8.7. Barriles. Fuente: autores.



Fotografía 8.8. Matraca para refinación. Fuente: autores.

Los otros entables muestreados en la mina El Alacrán son Eldeybi y Don Carlos, los cuales procesan mineral meteorizado o superficial que presenta baja competencia y alta friabilidad. Para la trituración y molienda se utilizan molinos de piones californianos seguidos de canalones para retener el mineral molido con mayor peso específico y canalones (matracas) para refinación.

La figura 8.6 muestra la relación de equipos que se encuentran en los entables. Se especifican algunas características, como potencia de los motores, dimensiones, velocidades de rotación, caudal de pulpa de producto (capacidad) y porcentaje de sólidos del producto.

Finalmente, se muestran las fotografías de los equipos que se encuentran instalados en los entables de Eldeybi.

Figura 8.5. Diagrama de beneficio actual de los entables que benefician mineral superficial en la mina El Alacrán. Fuente: autores.

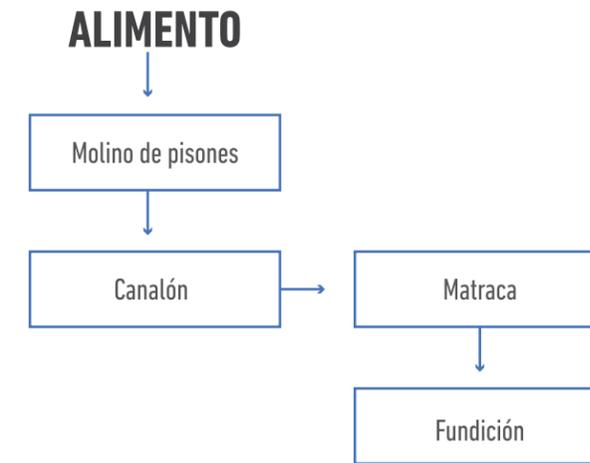


Figura 8.6. Descripción de los equipos de los entables de la mina El Alacrán para mineral superficial. Fuente: autores.

EQUIPO	# DE EQUIPOS	CARACTERÍSTICAS
Molino de piones	1	Número de piones: 3 Diámetro de la patea principal: 1,2 m Velocidad rotacional de la patea principal: 42 rpm Potencia nominal: 7,5 hp Longitud del canalón de producto: 1,5 m
Canalón para refinación (Matraca)	1	Ancho x longitud: 0,3 x 2,0 m Ángulo de inclinación: 7,0°



Fotografía 8.9. Molino de piones. Fuente: autores.



Fotografía 8.10. Matraca de refinación. Fuente: autores.

## 8.2. TENORES DE ORO EN LAS PLANTAS VISITADAS

Figura 8.7. Lista de las muestras colectadas en los entables de las minas en Puerto Libertador. Fuente: autores.

MINA	TENOR
<b>MINA TEHERÁN</b>	
Mineral superficial - Frente de mina	5,16
Cabeza molino 2 - Pila de alimentación	0,51
Producto Molino 2 - Concentrado canalón	0,55
Colas canalones - Molinos 1 y 2	0,48
Cabeza molino 3 - Pila de alimentación	0,98
Colas canalón - Molino 3	3,12
<b>MINA PIRITA</b>	
Cabeza molino pisonos - Pila de alimentación	7,94
Concentrado canalón - Molino de pisonos	21,92
Colas de matraca - Refinación primaria	14,20
Colas de canalón - Molino de bolas remodelador	8,30
Colas de canalón - Molino de pisonos	3,52
Súper concentrado de matraca - refinación secundaria	1073,00
<b>MINA BUENOS AIRES</b>	
Cabeza molino pisonos - Alimento 1 meteorizado	2,25
Cabeza molino pisonos - Alimento 2 roca competente	0,33
Concentrado de bayetas - Molino de pisonos	1060,49
Medios canalón alimento 2 - Molino de pisonos	0,20
Medios canalón alimento 1 - Molino de pisonos	1,67
Colas canalón - Molino de pisonos	1,17
Colas matraca - refinación primaria	0,54
Material repasado matraca - refinación secundaria	9,49
<b>MINA EL ALACRÁN - ENTABLE MANUEL DÍAZ</b>	
Frente de mina cobre mineral - Mineral superficial	0,47
Mineral de veta o competente - Pila de alimentación	6,31
Mineral superficial o meteorizado - Pila de alimentación	0,72
Colas finales - refinación primaria y secundaria	4,58
Colas canalón - Molino de bolas	2,46
<b>MINA EL ALACRÁN - ENTABLE EL ALACRÁN DORADO</b>	
Colas canalón - Molino de bolas	3,79
Colas finales - refinación primaria y secundaria	4,58
Cabeza de molino de bolas - Pila de alimentación	3,24
<b>MINA EL ALACRÁN - ENTABLE ELDEYBI</b>	
Cabeza molino pisonos - Pila de alimentación	1,70
Concentrado de canalón - Molino de pisonos	1,90
Colas de canalón - Molino de pisonos	2,11
<b>MINA EL ALACRÁN - ENTABLE DON CARLOS</b>	
Cabeza molino pisonos - Pila de alimentación	2,96
Concentrado de canalón - Molino de pisonos	9,11
Colas y medios de canalón - refinación primaria	9,04

## 8.3. CONSIDERACIONES MINERALÓGICAS DETERMINANTES EN LAS OPERACIONES Y PROCESOS METALÚRGICOS

### Composición

#### Minerales de importancia económica:

- Oro
- Plata
- Cobre

#### Presencia de minerales altamente interferentes en la cianuración

- Minerales de cobre
- Pirrotina
- Marcasita

#### Tamaño de liberación de los minerales metálicos

- En la mina Pirita, de una molienda a 300 micrones se tendría una liberación de los minerales metálicos de un 80%. A 75 micrones sería del 88%.
- Para el sector de El Alacrán, la medida hecha reporta que a una molienda de 425 micrones se tendría una liberación de los minerales metálicos de un 90%.
- Para el sector de la mina Raa, con una molienda a 425 micrones se tendría una liberación de los minerales metálicos de un 90%. A 150 micrones la liberación sería del 99%.

#### Tamaño y asociación del oro

- En la mina Pirita las partículas de oro se aprecian sin asociación. Moliendo a 100 micrones se dispondría del 52% del oro. A 50 micrones, el 70%; y a 10 micrones, el 95%.
- En El Alacrán, con una molienda de 75 micrones se tendría expuesto el 35% en peso del oro. A 35 micrones, el 92%.
- En mina Raa habría que moler hasta 35 micrones para tener expuesto el 92% del oro.
- En la mina Pirita un dispositivo como el canalón o la mesa podría concentrar el 52% del oro.
- En Alacrán y Raa el canalón y la mesa son menos eficientes.
- Se tienen unas condiciones propicias para la concentración del oro fino por medio de molienda fina y aplicación de la concentración centrífuga.
- Las condiciones mineralógicas no son favorables para la cianuración.

## 8.4. PRUEBAS METALÚRGICAS DE LABORATORIO

### 8.4.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES DE ESTUDIO

### 8.4.1.1. PESO ESPECÍFICO, ÍNDICE DE HARDGROVE EN ÍNDICE DE TRABAJO DE BOND (WI)

Figura 8.8. Peso específico e índices de Hardgrove y Bond para diferentes muestras de proceso de las plantas de mina Pirita y El Alacrán. Fuente: autores.

MUESTRA	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	HARDGROVE	WI BOND (kWh/t)
Cabeza Pirita	3,6	53,2	9,9
Concentrado de canalón Pirita	4,0	-	-
Cabeza Alacrán Manuel Díaz	4,0	80,9	6,5
Cabeza Alacrán dorado	3,4	-	-

### 8.4.1.2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE LAS MUESTRAS PRE-PARADAS

Figura 8.9. Distribuciones de tamaños de partícula de los minerales de la mina Pirita. Fuente: autores.

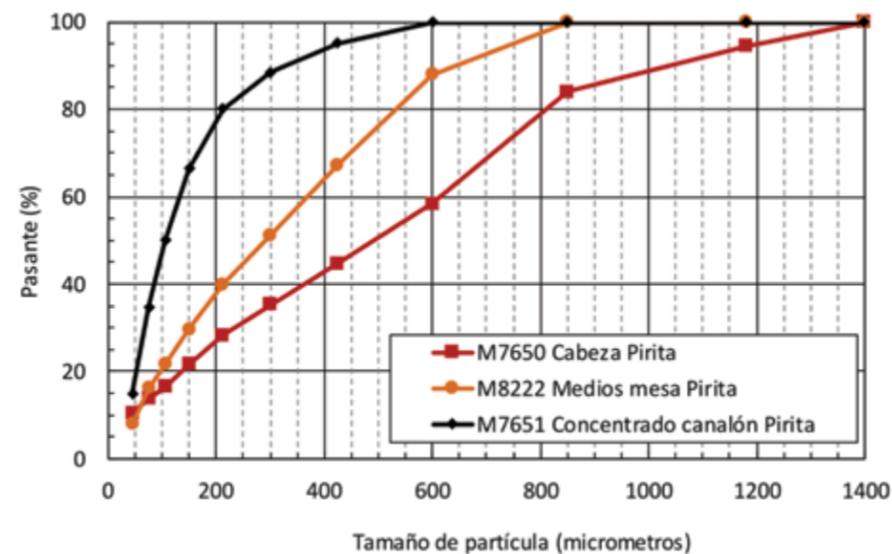
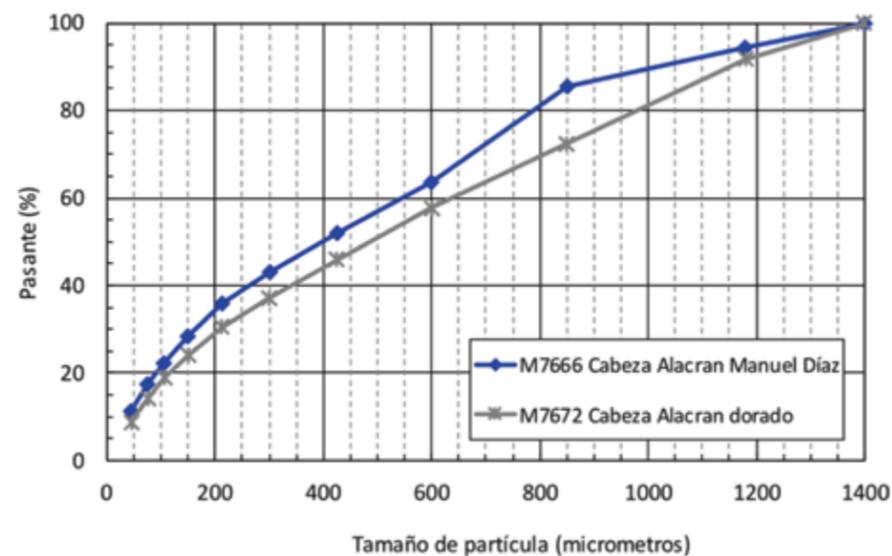


Figura 8.10. Distribuciones de tamaños de partícula de los minerales de la mina El Alacrán. Fuente: autores.



### 8.4.1.3. ACONDICIONAMIENTO DEL MINERAL PARA CONCENTRACIÓN

Figura 8.11. Distribuciones de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto (alimentación de la mesa Wilfley) para el mineral de cabeza de la mina Pirita. Fuente: autores.

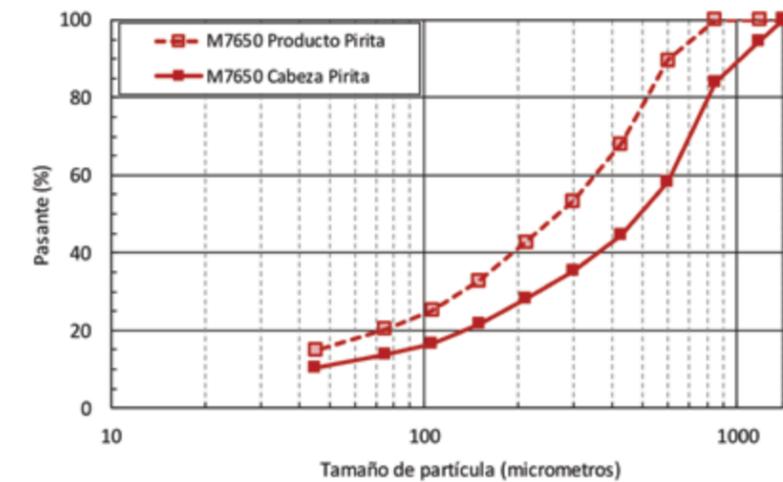


Figura 8.12. Distribuciones de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto (alimentación del centrífugo Knelson) para el concentrado de canalón Pirita. Fuente: autores.

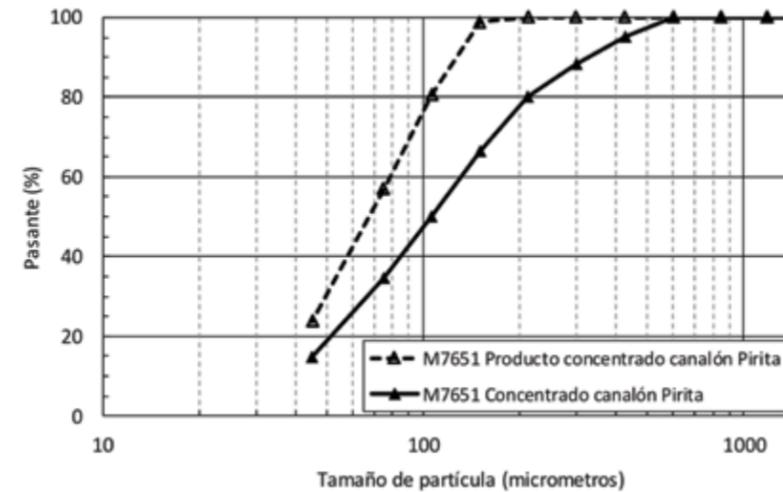


Figura 8.13. Distribuciones de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto (alimentación de flotación y separación magnética) para el mineral de cabeza de la mina El Alacrán Manuel Díaz. Fuente: autores.

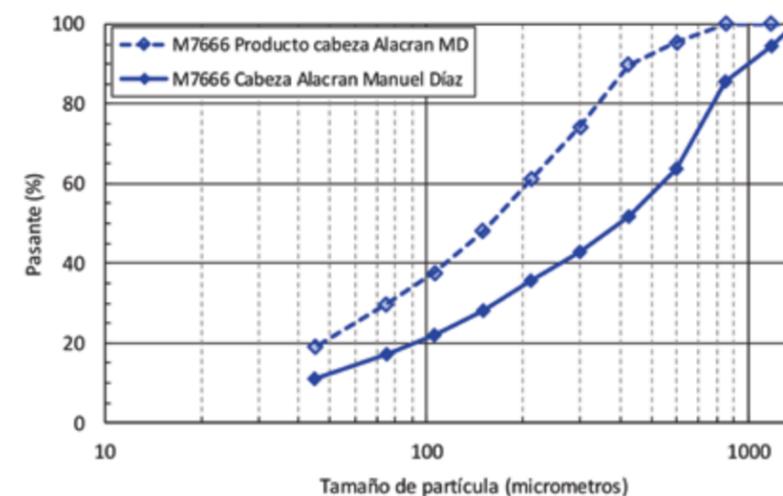
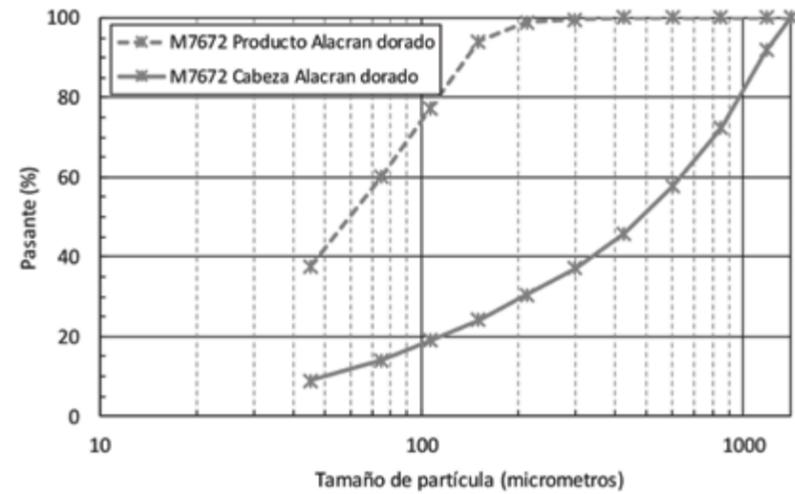


Figura 8.14. Distribuciones de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto (alimentación del centrífugo Knelson) para el mineral de cabeza de la mina El Alacrán dorado. Fuente: autores.



## 8.4.2. PLANTA DE BENEFICIO PIRITA

### 8.4.2.1. CONCENTRACIÓN EN MESA DEL MINERAL DE CABEZA DE LA MINA LA CIRILA

**Cabeza:** Cabeza mina Pirita  
**Molienda** hasta d80 =425 micrómetros  
**Tiempo de concentración:** 10 minutos  
**Agua de fluidización:** 7.5 L/m

**Cabeza:** Medios ensayo de mesa mina Pirita  
**Molienda** hasta d80 =150 micrómetros  
**Tiempo de concentración:** 5 minutos  
**Agua de fluidización:** 7.5 L/m

Figura 8.15. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza y medios de mesa de la mina Pirita. Fuente: autores.

	TIPO	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	PESO Au (µg)	% RECUPERACIÓN	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza de mina Pirita	Cabeza	1867	100.0	7,9	14749,3		
	Concentrado 1	427	22,9	15,0	6405	43,4	1,89
	Medios 1	1058	56,7	6,70	7088,6	48,1	
	Medios 2	212	11,4	3,63	769,56	5,2	
	Colas	169	9,1	2,80	473,2	3,3	
Medios de mesa Pirita	Cabeza	986	100,0	6,7	6616		
	Concentrado 1	151	15,3	28,0	4228	63,8	4,17
	Medios 1	360	36,6	4,0	1440	21,8	
	Colas	474	48,1	2,0	948	14,4	

### 8.4.2.2. REFINACIÓN EN BATEA

**Cabeza:** Concentrados del ensayo de mesa Wilfley La Cirila  
**Molienda** hasta d80 =425 micrómetros  
**Tiempo de concentración:** 5 minutos

Figura 8.16. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina La Reina de oro. Fuente: autores.

	TIPO	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	PESO Au (µg)	% RECUPERACIÓN	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Concentrado de mesa (Cabeza de Proceso)	Cabeza	493,5	100,0	18,26	9012,40		
	Super-concentrado de batea	6,23	1,3	815,1	5078,07	56,3	44,63
	Concentrado	15,56	3,2	13,31	207,10	2,3	
	Cola de batea	471,8	95,6	7,90	3727,22	41,4	

### 8.4.2.3. CONCENTRACIÓN CENTRÍFUGO

**Cabeza:** concentrado de canalón mina Pirita  
**Molienda** hasta d80 =106 micrómetros  
**Tiempo de concentración:** 2.56 y 4 minutos  
**Agua de fluidización:** 80 L/m

Figura 8.17. Concentración centrífuga medios de mesa remolidos mina Pirita. Fuente: autores.

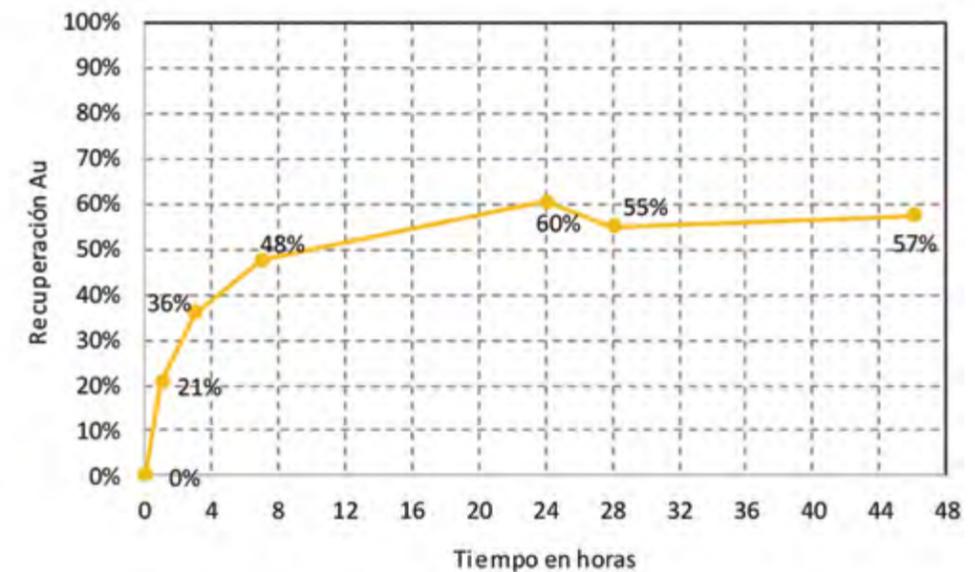
	TIPO	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	PESO Au (µg)	% RECUPERACIÓN	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Ensayo 1 2.56 min.	Cabeza	805,1	100,00	31,4	25280,1		
	Concentrado	96,6	12,0	140,31	13553,95	53,7	4,47
	Colas	708,5	88,0	16,5	11690,25	46,3	
Ensayo 2 4 min.	Cabeza	1648,2	100,0	32,73	53945,59		
	Concentrado	119,2	7,23	369,20	44008,64	81,6	11,28
	Colas	1529,0	92,77	6,5	9938,5	18,4	

### 8.4.2.4. CIANURACIÓN

Figura 8.18. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta La Cirila. Fuente: autores.

MUESTRA	CONSUMO DE CIANURO DE SODIO (kg/t)	CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO (kg/t)	TIEMPO DE CIANURACIÓN Y RECUPERACIÓN DE ORO (HORAS)	TAMAÑO DE PARTÍCULA d80 (µm)
Colas de batea	12,92	1,23	48	150

Figura 8.19. Lixiviación de oro por cianuración para las colas de batea planta Pirita. Fuente: autores.



## 8.4.3. PLANTA ALACRÁN

### 8.4.3.1. CONCENTRACIÓN CENTRÍFUGA MINERAL DE CABEZA

**Cabeza:** Cabeza de proceso mina Alacrán  
**Molienda** hasta d80 =106 micrómetros  
**Tiempo de concentración:** 2 y 5 minutos  
**Agua de fluidización:** 80 L/m

Figura 8.20. Concentración centrífuga cabeza de proceso mina Alacrán. Fuente: autores.

	TIPO	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	PESO Au (µg)	% RECUPERACIÓN	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Ensayo 1 2 min.	Cabeza	341,5	100,0	7,7	2629,5		
	Concentrado	35,7	10,5	17,0	606,9	23,2	2,2
	Colas	305,8	89,5	6,59	2015,2	76,8	
Ensayo 2 5 min.	Cabeza	1974,2	100	7,7	15149,8		
	Concentrado	114,3	5,8	100,0	11430	75,4	12,98
	Colas	1859,9	94,2	2	3719,8	24,6	

### 8.4.3.2. SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Figura 8.21. Separación magnética para el mineral de la mina El Alacrán Manuel Díaz. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	% RECUPERACIÓN
No Magnético	502,5	25,3	7,19	35,7
Magnético	1491,2	74,7	4,4	64,3
Totales	1993,7	100	5,1	100

### 8.4.3.3. CONCENTRACIÓN POR FLOTACIÓN

**Cabeza:** Cabeza de proceso mina Alacrán  
**Molienda** hasta d80 =45 micrómetros  
**Tiempo de acondicionamiento:** 6 minutos  
**Tiempo de espumación:** 8 minutos

Figura 8.22. Resultados concentración por flotación cabeza de proceso Alacrán. Fuente: autores.

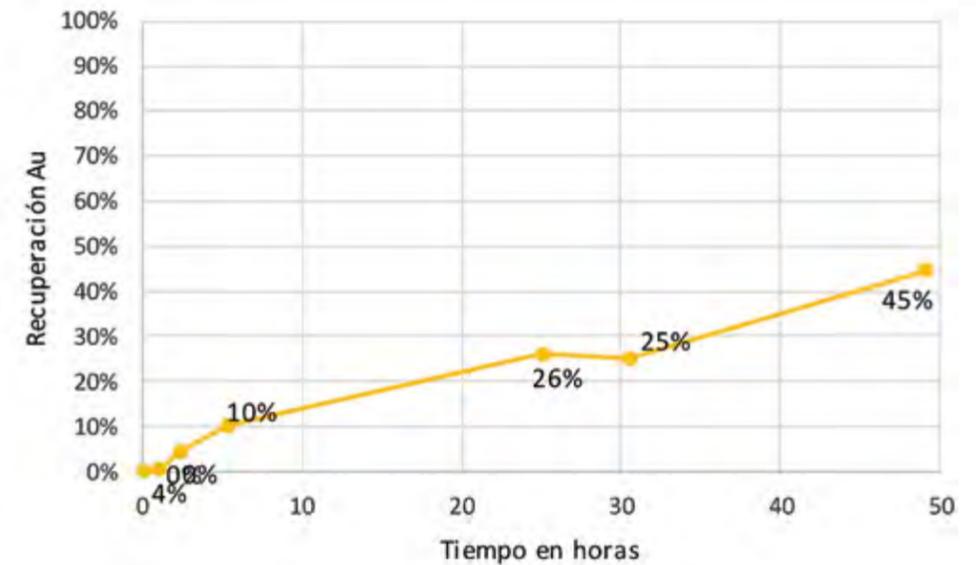
	TIPO	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	PESO Au (µg)	% RECUPERACIÓN	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Concentrado de mesa (Cabeza de Proceso)	Cabeza	496	100,0	5,1	2529,6		
	Concentrado 1	113	22,8	13,5	1525,5	60,6	2,64
	Colas	383	77,2	2,6	995,8	39,4	

### 8.4.3.4. CIANURACIÓN

Figura 8.23. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta Pujidos. Fuente: autores.

MUESTRA	CONSUMO DE CIANURO DE SODIO (kg/t)	CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO (kg/t)	TIEMPO DE CIANURACIÓN Y RECUPERACIÓN DE ORO (HORAS)	TAMAÑO DE PARTÍCULA d80 (µm)
Concentrados de flotación	7,7	2,30	48	45

Figura 8.24. Lixiviación de oro por cianuración los concentrados de flotación planta Alacrán. Fuente: autores.



Fotografía 8.11. Detalle de canalón en la planta el Alacrán. Fuente: autores.

# 8.5. PROCESO DE BENEFICIO SUGERIDO

Figura 8.25. Diagrama de beneficio sugerido para el mineral de la mina El Alacrán. Fuente: autores.

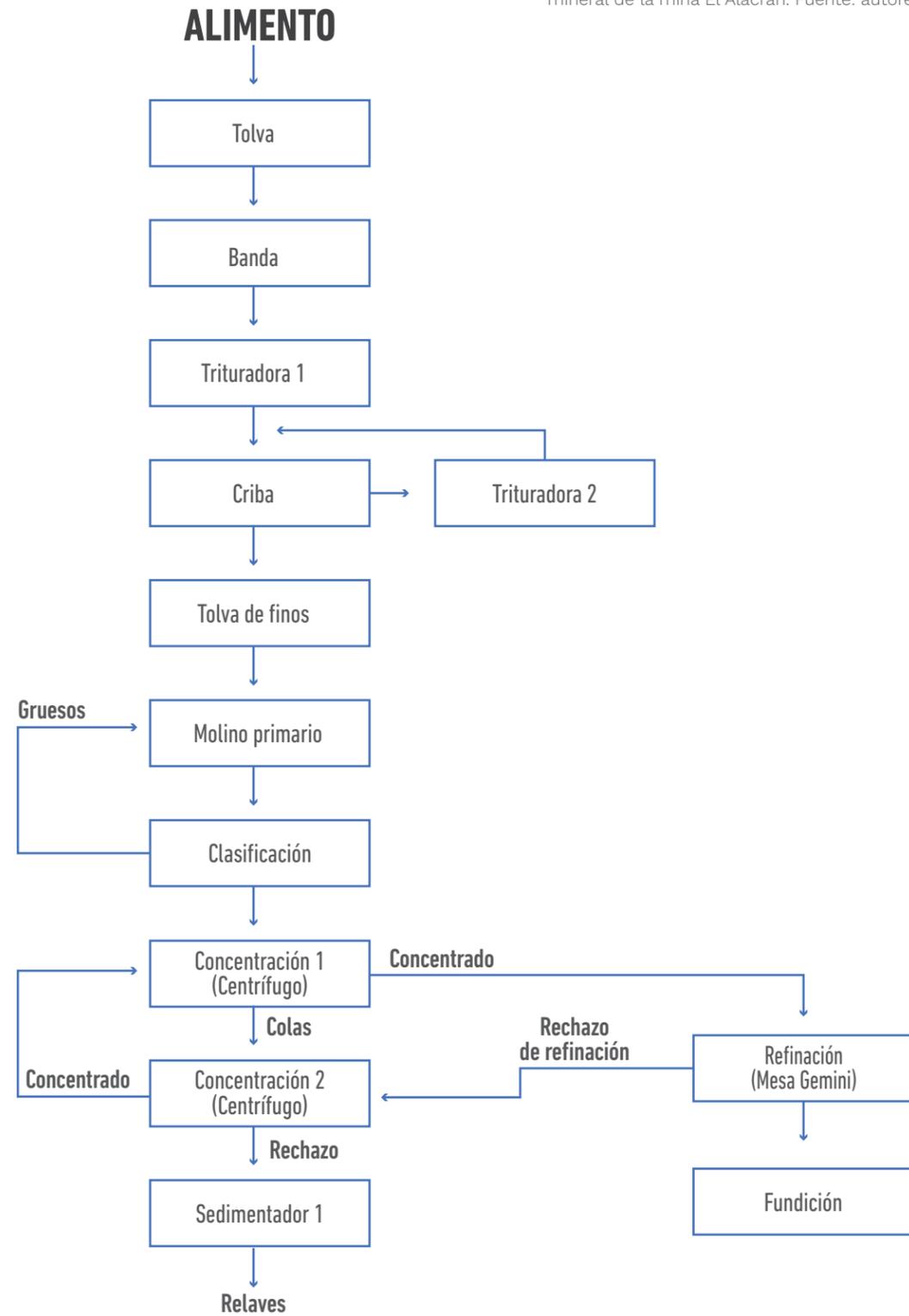
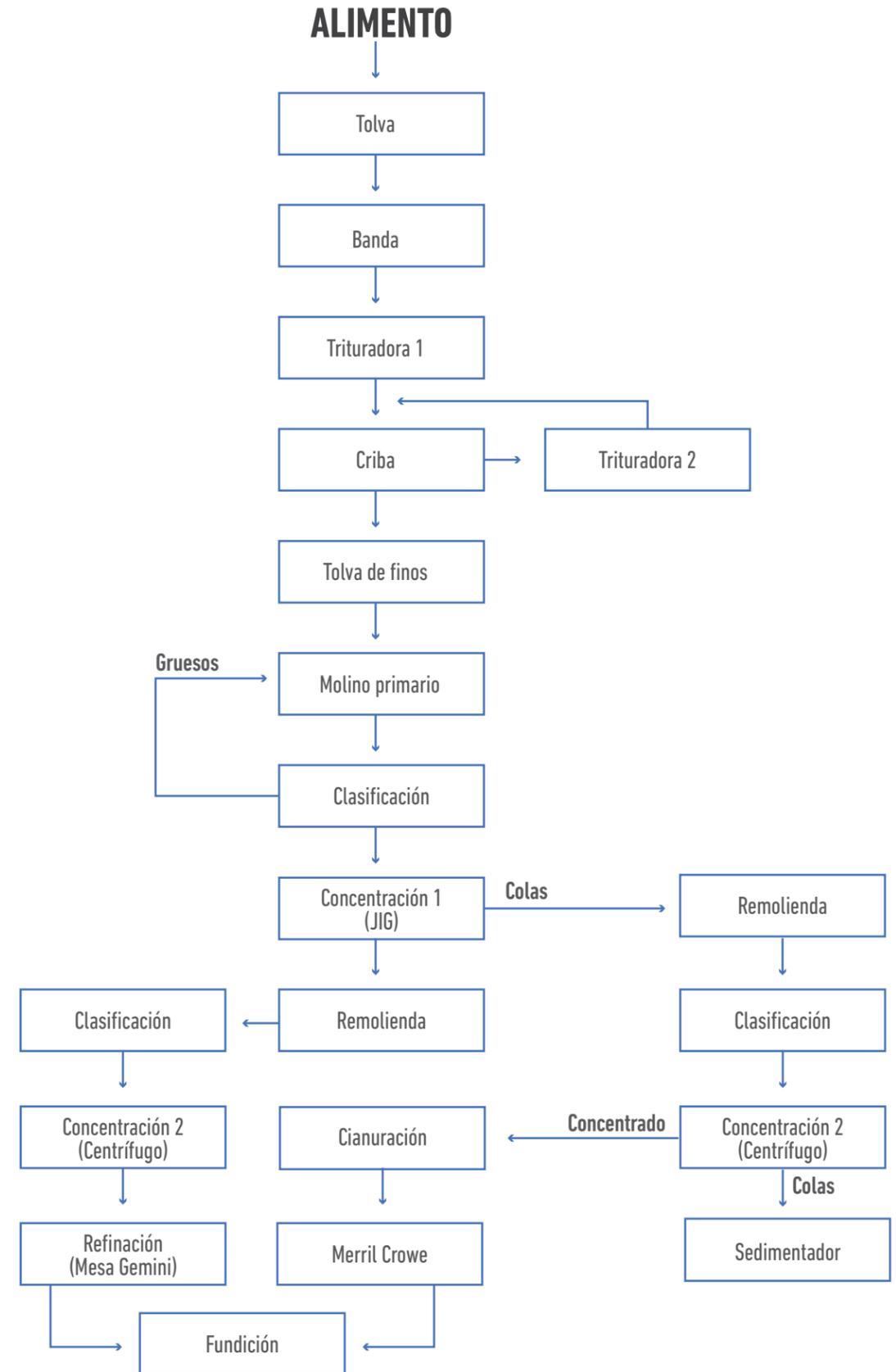


Figura 8.26. Diagrama de beneficio sugerido para el mineral de la mina Pirta. Fuente: autores.



## 8.6. BALANCES DE MATERIA DE LOS PROCESOS SUGERIDOS

Se presentan los dos diagramas de flujo sugeridos con el balance de materia que permiten visualizar y tener control de la cantidad de mineral de entrada y salida, así como de oro procesado en cada etapa del circuito de beneficio.

Figura 8.27. Diagrama de balance de materia de proceso sugerido, con cianuración. Fuente: autores.

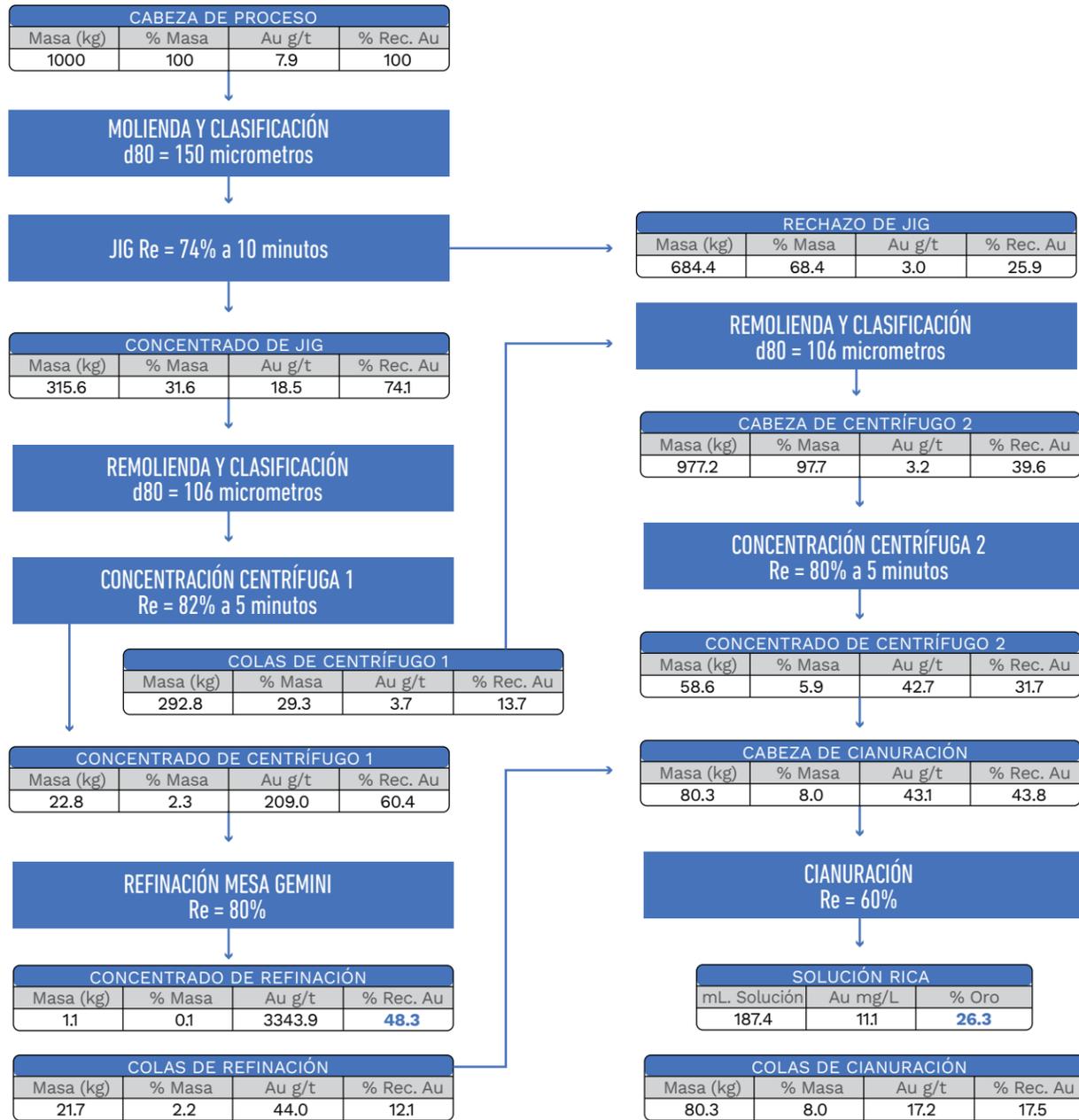
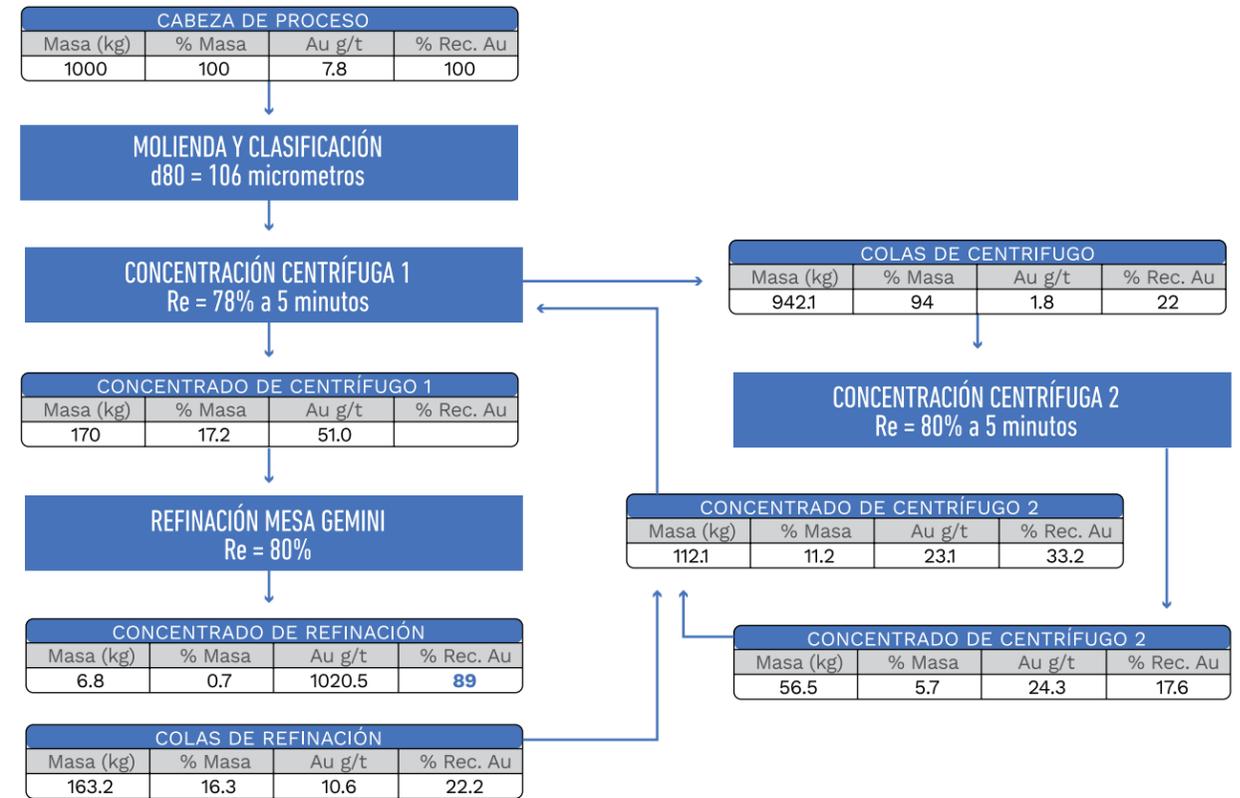


Figura 8.28. Diagrama de balance de materia de proceso sugerido, sin cianuración. Fuente: autores.



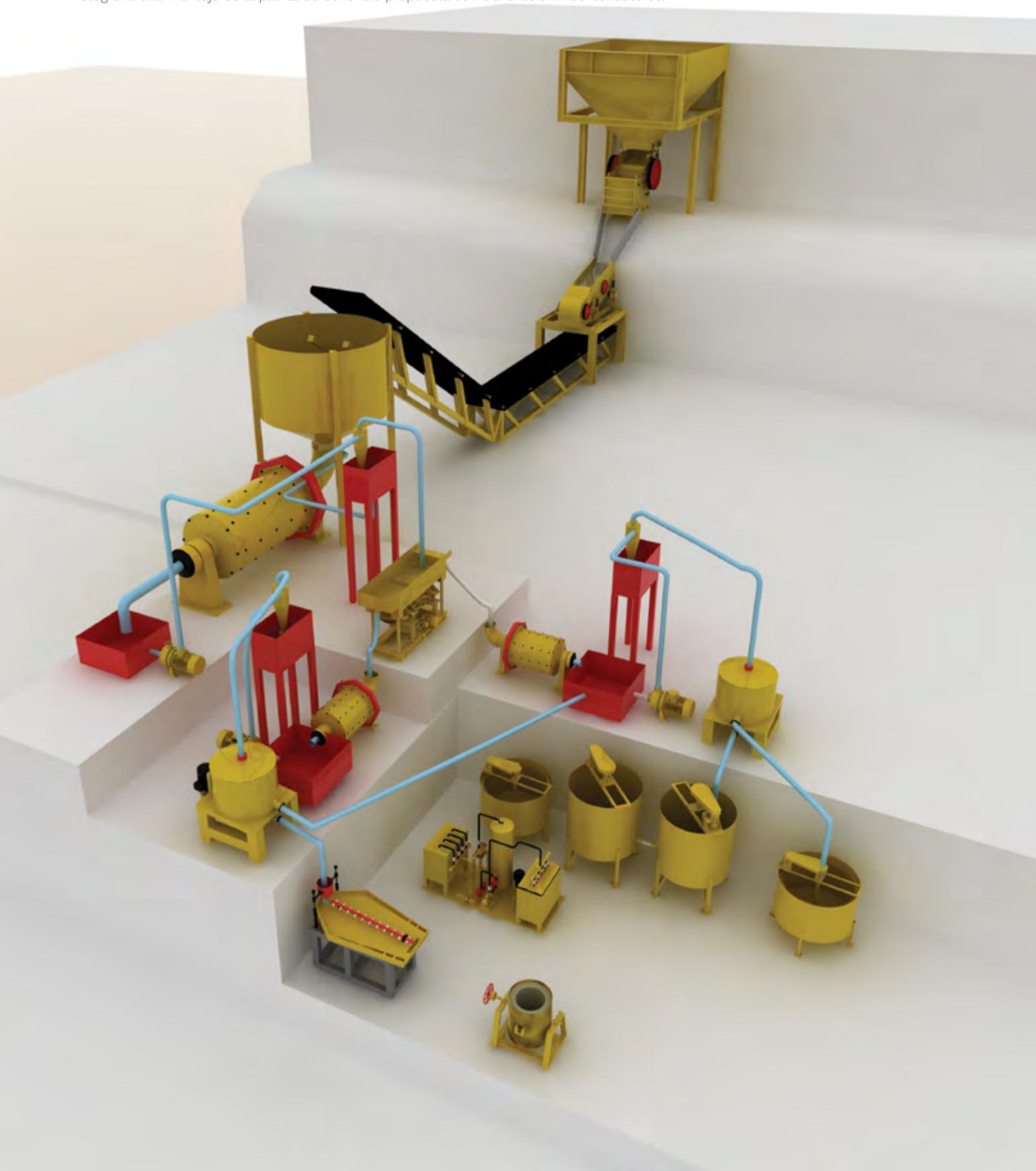
## 8.7. MONTAJE DE LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

Los gráficos muestran una aproximación a la configuración de la planta de beneficio que se requiere para seguir los pasos de las rutas metalúrgicas sugeridas; además, abarcan los equipos que componen la planta de beneficio. Esto permitirá la eliminación del mercurio, lo que hará que el proceso sea ambientalmente sostenible y redundará en una optimización de los recursos y en un mayor aprovechamiento del material, lo cual se traduce en un mayor porcentaje de recuperación de oro.

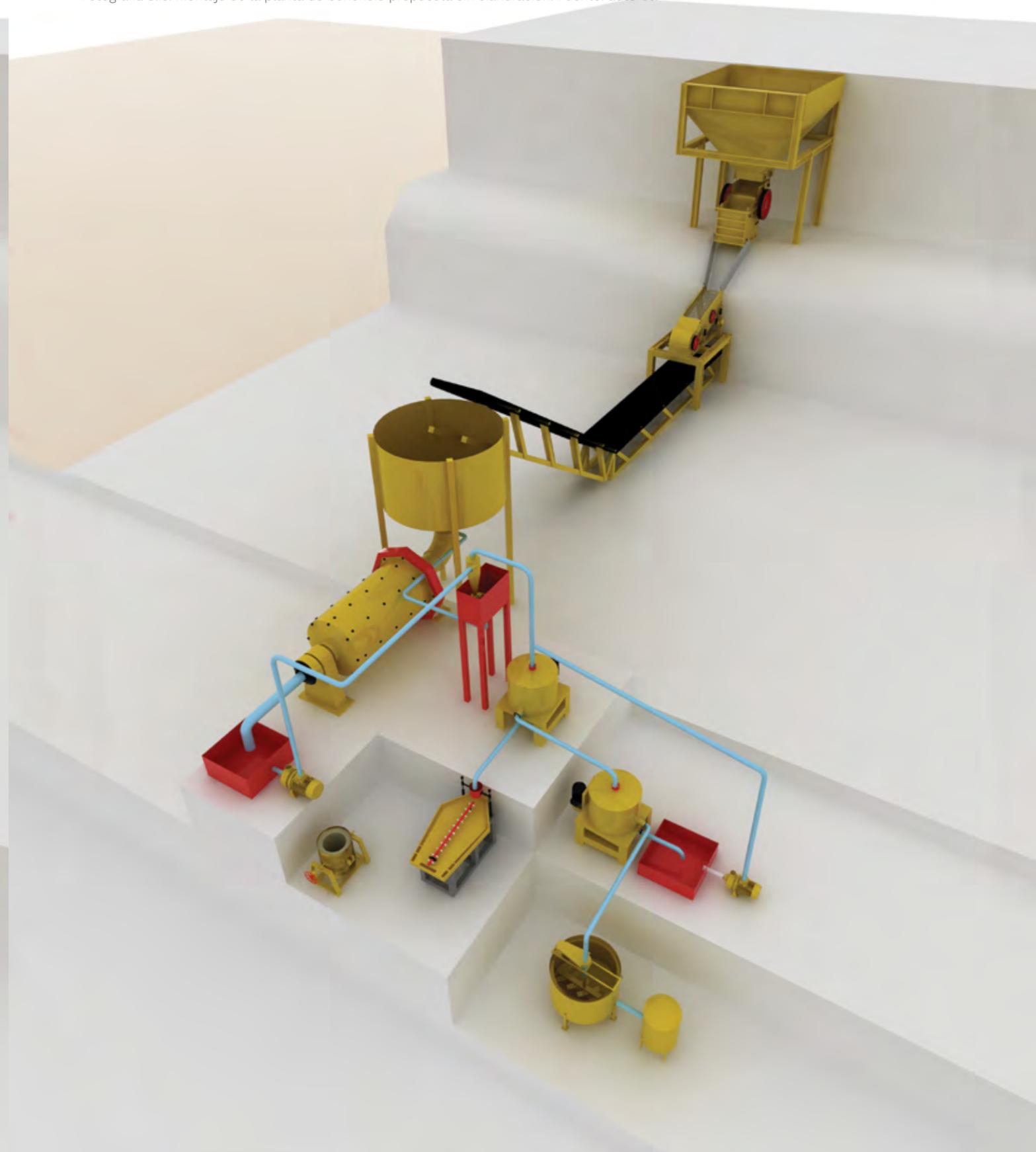
Para tener mayor información sobre las especificaciones técnicas se puede consultar la parte de maquinaria descrita en el capítulo 9, correspondiente al análisis económico y financiero.

Los equipos que se representan en la imagen se basan en los que componen la planta piloto del SGC en su sede Cali; el minero puede reemplazarlos por los equipos que dispone, verificando que estos sean equivalentes en las prestaciones ofrecidas para la eficiencia de las operaciones unitarias. Para tener mayor información sobre las especificaciones técnicas se puede consultar la parte de maquinaria descrita en el capítulo 9, correspondiente al análisis económico y financiero. en este apartado se describen las potencias de los motores y capacidad de procesamiento.

Fotografía 8.12. Montaje de la planta de beneficio propuesta con cianuración. Fuente: autores.



Fotografía 8.13. Montaje de la planta de beneficio propuesta sin cianuración. Fuente: autores.



# 8.8. DIAGRAMA DE FLUJO CORRESPONDIENTE A LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

A continuación se muestran los diagramas de flujo de la planta de beneficio que se implementaría en la zona minera, con sus respectivas líneas de entradas y salidas de cada operación unitaria. Estos diagramas responden a la ruta metalúrgica propuesta y al montaje de la planta sugerida.

Figura 8.29. Diagrama de flujo de planta de beneficio sugerida, con cianuración. Fuente: autores.

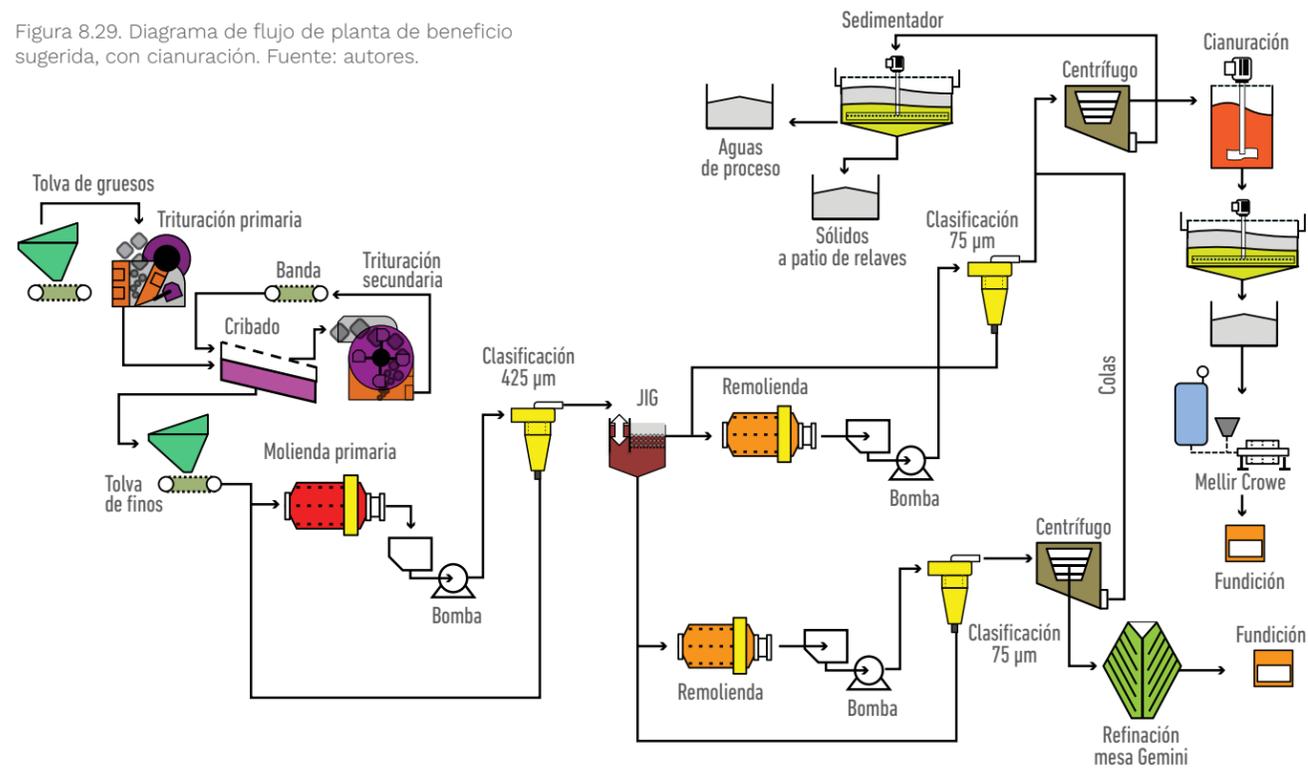
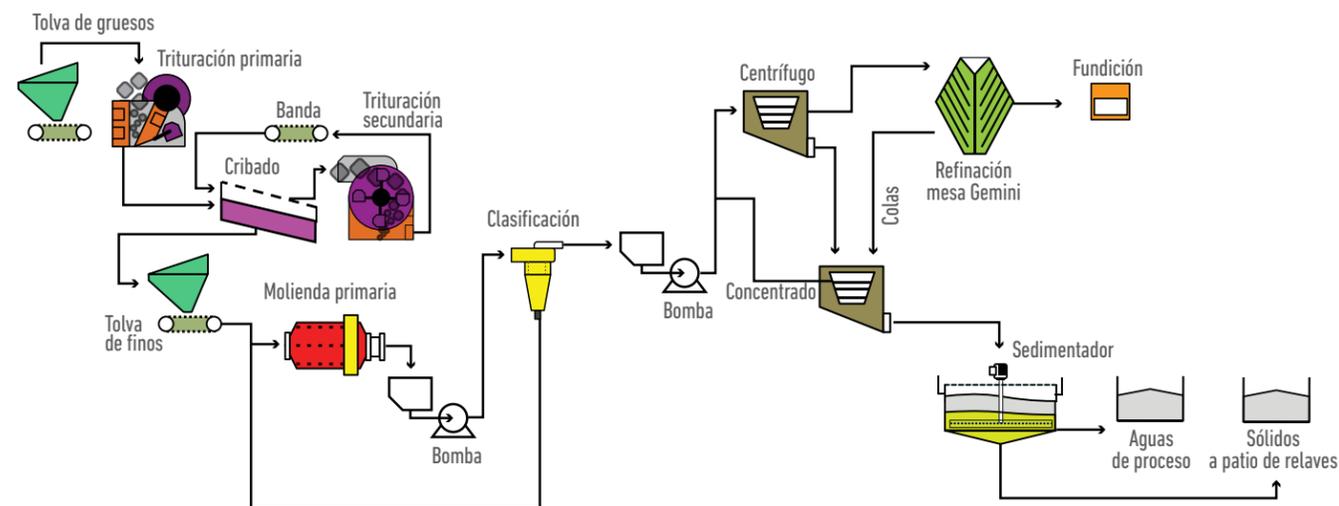


Figura 8.30. Diagrama de flujo de planta de beneficio sugerida, sin cianuración. Fuente: autores.



## Convenciones

SÍMBOLO	MÁQUINA	FOTOGRAFÍA
	TOLVA	
	TRITURADORA DE QUIJADAS	
	CRIBA VIBRATORIA	
	MOLINO CHILENO	
	MOLINO DE BOLAS	
	HIDROCICLÓN	
	BANDA TRANSPORTADORA	
	MERRIL CROWE	
	CELDA DE FLOTACIÓN CIRCULARES	
	TANQUE DE COLAS	

SÍMBOLO	MÁQUINA	FOTOGRAFÍA
	JIG CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO	
	CAJA DE PULPA	
	BOMBA CENTRÍFUGA	
	MESA DE CONCENTRACIÓN	
	TANQUES AGITADORES	
	TANQUE SOLUCIÓN RICA	
	TANQUE SOLUCIÓN POBRE	
	TANQUE DE AGUA DE PROCESO	
	SEDIMENTADOR / TANQUE ESPESADOR	
	FUNDICIÓN CRISOL	

## 8.9. CONCLUSIONES METALÚRGICAS

### 8.9.1. CONSIDERACIONES SOBRE LAS PLANTAS DE BENEFICIO EN LA ZONA ESTUDIADA

- La zona minera de Puerto Libertador presenta principalmente plantas de beneficio de oro del tipo entable. Los entables utilizan equipos característicos de la MAPE, como molinos californianos de pisones, barriles para molienda, canalones para concentración y matraca para la refinación de concentrados. Pocos entables tienen trituradoras de mandíbulas o molinos de bolas. La introducción de tecnologías apropiadas es necesaria para mejorar la recuperación de oro en las plantas de beneficio.
- Los entables de la zona minera de Puerto Libertador obtienen el oro de forma gravimétrica por medio de sucesivas concentraciones, usando un canalón o matraca hasta obtener un concentrado que es fundido directamente. No fueron observados los procesos de cianuración o amalgamación en ninguno de los entables.
- El caso de la planta de beneficio de la mina Pirita es particularmente importante. Con destreza, los mineros son capaces de exponer el oro en el canalón de la matraca, luego de sucesivas concentraciones gravimétricas en el canalón. Este ejemplo expone una alternativa palpable y posible para el pequeño minero, con la que se puede sustituir la amalgamación.
- En promedio, los tenores de oro de los minerales de cabeza de la zona de Puerto Libertador no superan los 9 g Au/t. Los tenores de las colas de proceso aun presentan valores significativos de oro de entre 1 y 4 g Au/t. Con excepción de la mina Pirita, los entables no tienen una disposición adecuada para el reproceso o cianuración de los relaves.

**Los entables de la zona minera de Puerto Libertador obtienen el oro de forma gravimétrica por medio de sucesivas concentraciones, usando un canalón o matraca hasta obtener un concentrado que es fundido directamente. No fueron observados los procesos de cianuración o amalgamación en ninguno de los entables**

### 8.9.2. CONSIDERACIONES SOBRE LOS MATERIALES QUE ALIMENTAN LAS PLANTAS DE BENEFICIO EN LA ZONA ESTUDIADA Y EL MÉTODO METALÚRGICO

- Los materiales de cabeza de proceso estudiados por el laboratorio de metalurgia, presentan baja competencia a la molienda con WI entre 6,5 – 9,9 kWh/t. Es decir, relativamente blandos. Dichos materiales presentan bajas concentraciones de minerales de ganga como cuarzo y carbonatos, y concentraciones relativamente altas de minerales metálicos
- Comparando los métodos de concentración según la recuperación y concentración del oro, el método con que mostró mejores resultados fue la concentración por centrifugación. La concentración magnética, la flotación y la concentración en mesa Wilfley no presentaron la eficiencia deseada.
- El diagrama de proceso sugerido para la zona de Puerto Libertador se basa en la extracción de oro por medios gravimétrico. Está compuesto por un circuito de reducción e tamaño con trituradora de

mandíbulas, criba y pulverizador de martillos, y la molienda en molino continuo de bolas. Como operación de clasificación de tamaño se propone el hidrociclón que alimentará la concentración centrífuga con un tamaño específico adecuado.

- Los concentrados del concentrador centrífugo son refinados en una mesa Gemini y llevados a fundición directa. El proceso de cianuración no se recomienda para esta zona debido a la refractariedad química del material.
- Los materiales analizados presentan contenidos de plata significativos. Por ejemplo se reportó 53.15 y 45.5 g/t en Mina Pirita y mina Buenos Aires, respectivamente. Un concentrado de matraca de Mina Pirita reportó 379.44 g/t de plata.
- Un recurso importante del material de mina es el cobre. Muestras de materiales de trabajo en las plantas de beneficio reportaron concentraciones importantes de cobre, por ejemplo, de 7,56 % en la mina Buenos Aires y 4,59 % en la Mina Teherán.

**Comparando los métodos de concentración según la recuperación y concentración del oro, el método con que mostró mejores resultados fue la concentración por centrifugación. La concentración magnética, la flotación y la concentración en mesa Wilfley no presentaron la eficiencia deseada.**

## 9. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

La toma de decisiones de inversión en proyectos de reconversión y modernización tecnológica de una empresa minera requiere un análisis económico y financiero riguroso, a fin de establecer la pertinencia de emprender el proyecto y efectuar una asignación eficiente de recursos.

En este capítulo se aportan los fundamentos teóricos y metodológicos mínimamente necesarios para que el minero pueda realizar un ejercicio de planeación y evaluación financiera de la operación futura de su mina y de su planta de beneficio, después de haber implementado alguna de las dos rutas metalúrgicas propuestas en esta guía.

---

Oro resultante del proceso de beneficio en Puerto Libertador (Córdoba). Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano

# 9.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO

Esta primera sección se dedica al estudio de generalidades teóricas sobre los proyectos de inversión y al análisis de cada una de las etapas que comprenden el estudio y la evaluación financiera de proyectos de inversión.

## 9.1.1. GENERALIDADES SOBRE LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN

### 9.1.1.1. DEFINICIÓN

Un proyecto de inversión puede definirse como un plan que consta de dos elementos esenciales: el primero, una serie de actividades secuenciales e interrelacionadas entre sí, y el segundo, la descripción de un agregado de recursos o medios que permitirán realizar la materialización de una idea, la solución de un problema o la satisfacción de una necesidad.

### 9.1.1.2. CLASIFICACIÓN

De modo general, los proyectos de inversión pueden clasificarse de tres formas:

1. **Según la categoría.** Según esta clasificación, los proyectos pueden ser de prestación de servicios o de producción o fabricación de bienes (en este caso, el proyecto es de producción de bienes).
2. **Según la actividad económica.** Esta clasificación se efectúa con base en el sector económico que atiende el proyecto (en este caso, el sector económico del proyecto es el de minería aurífera).
3. **Según el carácter y la naturaleza de la entidad que los promueva.** De acuerdo con esta característica, los proyectos se clasifican en privados (con ánimo de lucro) y públicos (sin ánimo de lucro) (en este caso, el proyecto es de carácter privado con ánimo de lucro).

### 9.1.1.3. EL CICLO DE LOS PROYECTOS

La expresión *ciclo de vida de un proyecto* hace referencia al conjunto de etapas secuenciales que van desde su inicio hasta su cierre. En la formulación y evaluación de proyectos es indispensable disponer de información oportuna, confiable y suficiente en cada una de estas etapas, con el objetivo de que el inversionista pueda tomar la mejor decisión en función de sus necesidades.

Las etapas del ciclo de vida de los proyectos son la propuesta, la preinversión, la inversión y la operación.

#### La propuesta

En esta etapa se llevan a cabo los estudios diagnósticos necesarios para identificar el problema o los problemas que se esperan solucionar, al igual que las oportunidades de negocio que puedan ser aprovechadas.

---

**Los proyectos de inversión tienen varios orígenes. En el caso de los proyectos de modernización tecnológica, estos resultan de la necesidad de las empresas de aumentar su productividad, adoptar prácticas responsables con el medio ambiente y disminuir costos directos para competir eficientemente en el mercado, en función del precio y la calidad, y, a la vez, contribuir al desarrollo sostenible del lugar o comunidad en donde se desarrolla el proyecto.**

---

En el caso de los proyectos de modernización tecnológica, esta etapa corresponde a todos los estudios diagnósticos del sistema de operación que se realizan con el fin de identificar necesidades de reemplazo de maquinarias y equipos obsoletos y la sustitución de procesos.

#### La preinversión

Esta etapa comprende la realización de estudios previos a la toma de decisiones de inversión. Por lo general, esta etapa se divide en dos fases: la formulación y la evaluación.

- **La formulación del proyecto**

En la fase de formulación, los estudios técnicos que se efectúan tienen como objetivo fundamental establecer los mejores procedimientos para satisfacer la necesidad o solucionar los problemas previamente identificados, así como cuantificar los recursos necesarios para la implementación de la propuesta de mejora y, finalmente, estimar los ingresos y egresos que resultarán de la operación del proyecto.

La etapa de formulación del proyecto se puede desarrollar en dos niveles: prefactibilidad y factibilidad.

##### Prefactibilidad

En los estudios de prefactibilidad, las investigaciones se realizan de forma preliminar a partir de información proveniente de fuentes primarias (trabajo de campo) y secundarias (bibliográficas). Vale la pena aclarar que en algunos casos la información secundaria es limitada, por lo cual es necesario realizar una investigación más profunda antes de decidir la elaboración de un estudio definitivo o de factibilidad.

##### Factibilidad

En los estudios de factibilidad, o definitivos, las investigaciones que se realizan son de mayor profundidad, puesto que la información resultante debe permitir la definición de estrategias definitivas para la materialización de la propuesta. Por lo general, los estudios de prefactibilidad o de factibilidad contienen los siguientes estudios:

- Estudio de mercado, que permite verificar la existencia de mercado para el bien o servicio, por medio del estudio de la demanda, la oferta y los precios del bien que se va a producir.
- Estudio técnico, que tiene como propósito evaluar la viabilidad técnica de la producción del producto para alcanzar los objetivos del proyecto y descartar contingencias técnicas que impidan su implementación.
- Estudio organizacional, que permite verificar la mejor forma de organización o estructura empresarial del proyecto productivo, de acuerdo con sus características y necesidades específicas.
- Estudio financiero, que permite cuantificar el monto de las inversiones necesarias para la implementación de la propuesta y definir potenciales ingresos y los posibles egresos de operación durante el período de evaluación del proyecto. Para el efecto se considera la información resultante de los estudios que le anteceden (de mercado, organizacional y técnico).

- **La evaluación del proyecto**

En esta fase se valora la viabilidad de la propuesta de inversión tomando como referencia la información contenida en cada uno de los informes técnicos. El objetivo fundamental de esta fase es evaluar la bondad financiera de las alternativas encontradas, con el fin de aceptarlas o rechazarlas, conforme a las exigencias de rentabilidad del inversionista.

#### La inversión

En esta etapa se materializan las acciones contenidas en los estudios técnicos que se efectuaron en la etapa de preinversión, lo cual da como resultado la adquisición de bienes o servicios que servirán para satisfacer la necesidad o solucionar los problemas previamente identificados.

La etapa de inversión comprende el período en que se toma la decisión de implementar el proyecto (desembolso del dinero) y finaliza en el momento en que el proyecto inicia su operación.

## La operación

Esta etapa corresponde al período de permanente producción de bienes o prestación de servicios. En el caso de los proyectos de modernización tecnológica, la etapa de operación inicia en el momento en que se utiliza la maquinaria y se emplean procesos nuevos para la producción de bienes.

## 9.1.2. ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN

### 9.1 2.1. PROPÓSITO DEL ESTUDIO FINANCIERO

El estudio financiero integra la información contenida en los demás estudios técnicos, y su objetivo primordial es valorar el monto de la inversión necesaria para la implementación de la propuesta, así como estimar los ingresos y egresos de la operación del proyecto durante el tiempo de evaluación.

#### 9.1.2.2. ETAPAS DEL ESTUDIO FINANCIERO

La elaboración del estudio financiero comprende tres etapas: a) inversión inicial, b) ingresos operacionales, y c) costos operacionales.

#### Inversión inicial

Esta etapa consiste en la identificación y cuantificación monetaria de los costos de la inversión para la puesta en marcha de la propuesta. Estas inversiones están representadas en activos fijos y activos diferidos.

- **Activos fijos**

Son aquellos activos tangibles que se emplean de forma constante en la producción de bienes y servicios. El costo de estos activos comprende, además del valor de su compra, los demás gastos en que incurre la empresa para dejarlos en condiciones de uso. Algunos ejemplos de este tipo de activos son los terrenos, edificaciones, maquinaria y equipos, vehículos, minas y canteras, entre otros.

A su vez, estos activos fijos se subdividen en tres clases: a) no depreciables (con vida útil ilimitada), b) depreciables (con vida útil limitada) y c) agotables (representados en recursos naturales cuya cantidad y valor disminuyen al ser extraídos).

- **Activos diferidos**

Son aquellos activos o inversiones que se realizan en contratación de servicios o derechos que se requieren para la puesta en marcha del proyecto. Algunos ejemplos de este tipo de activos son las licencias ambientales para la explotación de recursos naturales, pago de estudios técnicos y pago de permisos o derechos adquiridos, entre otros.

---

**Teniendo en cuenta que el presente capítulo tiene por objetivo primordial aportar información suficiente al minero para que por su cuenta realice un ejercicio de planeación financiera, en esta sección se incluye una explicación detallada de cada una de las etapas que comprende el estudio y la evaluación financiera de proyectos de inversión.**

---

---

**La inversión en compra de maquinaria y equipos requeridos para la adecuación de la planta se recupera descontando su valor de las utilidades que se reportan a la DIAN para efectos de pagar el impuesto de renta**

---

## Costos operacionales

De acuerdo con el *Glosario minero* de 2017, el costo operacional es el total que se deriva de las erogaciones que hace el contratista por concepto del pago de salarios al personal, y de todos los otros gastos relacionados con el desarrollo de la operación.

En el caso de los proyectos que tienen como objeto la producción de bienes, los costos operacionales se subdividen en costos directos y costos indirectos.

- **Costos directos**

Son aquellas erogaciones o gastos que tienen relación directa con la fabricación del producto. Algunos de estos están relacionados con materia prima, insumos, mano de obra directa (operarios), mantenimiento, depreciación de maquinaria y equipos, etc.

- **Costos indirectos**

Son aquellas erogaciones o gastos que no se relacionan directamente con la fabricación del producto. Algunos de estos están relacionados con mano de obra indirecta (servicios de aseo y vigilancia), servicios públicos, arrendamiento de plantas, etc.

---

**Se puede precisar que una inversión es conveniente si al final del período de evaluación de esta se logra recuperar con intereses y deja un excedente.**

---

## Ingresos operacionales

De acuerdo con el *Glosario minero* de 2017, los ingresos operacionales son la entrada de dinero a una empresa derivada de la venta de sus productos, servicios, operaciones financieras y otros.

### 9.1.2.3. PROPÓSITO DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera de proyectos tiene como objetivo fundamental comprobar la pertinencia de iniciar un proyecto, para lo cual es necesario valorar la rentabilidad de la inversión a la luz de las exigencias de rentabilidad propias del inversionista.

### 9.1.2.4. ETAPAS DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera de proyectos comprende esencialmente dos etapas: la construcción del flujo de caja del proyecto y la aplicación de métodos de evaluación para establecer la conveniencia de emprender o no un proyecto.

---

**El valor anual del desgaste de la maquinaria y de los equipos por uso (depreciación) se debe incluir en el flujo de caja del proyecto como gasto deducible de los impuestos que hay que pagar.**

---

#### La construcción del flujo de caja del proyecto

El flujo de caja constituye una herramienta esencial para la evaluación de proyectos, pues contiene el registro sistematizado de la información financiera necesaria para construir los indicadores de rentabilidad del proyecto. En efecto, esta herramienta permite determinar los flujos netos de efectivo que se utilizan en las técnicas de evaluación de proyectos.

Los componentes del flujo de caja son: a) inversión inicial del proyecto, b) ingresos y egresos reales de efectivo, c) depreciación y amortización, d) impuestos causados y pagados.

Debe tenerse en cuenta que, en la construcción del flujo de caja se consideran los ingresos y egresos en el momento en que ocurren.

## Aplicación de métodos para evaluar proyectos de inversión

Entre los métodos más reconocidos para la evaluación financiera de proyectos de inversión se encuentran la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VPN) y la relación beneficio-costos (RB/C).

### Valor presente neto

El valor presente neto (VPN) es una cifra monetaria que resulta de comparar el valor presente de los ingresos con el valor presente de los egresos; es decir, es el valor de la diferencia entre los ingresos y egresos del proyecto (flujos netos de efectivo) en pesos de la misma fecha (Mesa, 2010).

Para comparar la diferencia de los ingresos y egresos del proyecto en pesos de una misma fecha se requiere trasladar estas cifras monetarias del futuro al presente, para lo cual es necesario definir una tasa de descuento.

Los criterios para aceptar o rechazar un proyecto utilizando el VPN, de acuerdo con lo planteado por Mesa (2010), son los siguientes:

- Si el VPN es mayor de cero, se acepta el proyecto (el inversionista gana más de lo que quería ganar: el VPN indica cuánto más ganó en pesos del presente).
- Si el VPN es igual a cero, es indiferente aceptar el proyecto (el inversionista gana lo que quería ganar después de recuperar la inversión inicial).
- Si el VPN es menor de cero, se rechaza el proyecto (el VPN indica la cantidad de dinero en pesos del presente que faltó para que el inversionista ganara lo que pretendía ganar —esto no indica pérdida—).

### Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno (TIR) es un indicador de rentabilidad financiera que indica hasta cuánto el inversionista podría aumentar su rendimiento a partir de lo invertido en el proyecto (tasa de descuento). En este caso, la TIR es la tasa que hace que el VPN sea igual a cero.

Los criterios para aceptar o rechazar un proyecto utilizando la TIR, de acuerdo con lo planteado por Meza (2010), son los siguientes:

- Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, se acepta el proyecto (el inversionista obtiene un rendimiento mayor que el esperado).
- Si la TIR es igual a la tasa de descuento, es indiferente aceptar o no el proyecto (el inversionista es indiferente respecto a emprender o no el proyecto).
- Si la TIR es menor que la tasa de descuento, se rechaza el proyecto (el inversionista gana menos de lo que pretendía ganar).

### Análisis de la relación beneficio-costos

En este análisis se mide la relación beneficio-costos (RB/C) de un proyecto, que se obtiene mediante la división de la suma total de los ingresos generados durante el tiempo de evaluación entre la sumatoria de los costos del mismo, ambas sumas valoradas en pesos de hoy.

Para calcular la relación beneficio-costos es necesario aplicar la fórmula del VPN para traer a valor presente los valores futuros de los ingresos y costos del proyecto.

Los criterios para aceptar o rechazar un proyecto utilizando la relación beneficio-costos son los siguientes:

- Si la RB/C es mayor que uno, se acepta el proyecto (los beneficios son mayores que los costos, aun si se incluye la inversión inicial).
- Si la RB/C es igual a cero, es indiferente aceptar o no el proyecto (los beneficios son iguales a los costos).
- Si la RB/C es menor que uno, se rechaza el proyecto (los beneficios son menores que los costos).

## 9.2. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR (RUTA METALÚRGICA 1)

En esta sección se enseña la metodología que se emplea en cada una de las etapas del estudio y evaluación financiera del proyecto, correspondiente a la ruta metalúrgica 1 (zona minera de Puerto Libertador), al mismo tiempo que se exponen las recomendaciones técnicas (provenientes de los estudios geológico, minero, metalúrgico y químico-ambiental) que soportan la definición de las variables de operación de la mina y de la planta de beneficio que representa las condiciones típicas de la zona, y se presentan los supuestos que se tuvieron en cuenta para realizar la proyección de ingresos y egresos de la operación futura, durante el horizonte de evaluación definido.

Figura 9.1. Variables de operación futura de la mina y planta de beneficio. Fuente: autores.

### Variables de operación futura de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador (ruta metalúrgica 1)

Para la realización del estudio financiero se establecieron unas variables de operación de la mina y de la planta de beneficio típicas de la zona, que fueron determinadas por el equipo técnico a partir de la información recolectada en campo y los resultados de los estudios técnicos efectuados.

#### 9.2.1. ESTUDIO FINANCIERO

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente las inversiones en activos fijos y diferidos que se requieren para la puesta en marcha de la ruta metalúrgica 1, como se explica enseguida.

VARIABLE	VALOR
Tiempo de trabajo en mina	8 h/día
Volumen de material de mina extraído	24 t/día
Volumen de material estéril extraído	16 t/día
Volumen de material mineral extraído	8 t/día
Capacidad de procesamiento planta	1 t/h
Tiempo de funcionamiento de la planta	8 h/día
Volumen de procesamiento	8 t/día
Turnos por día	1 por día
Días de operación al mes	26 días
Volumen de procesamiento	208 t/mes
Tenor por tonelada de material de mina	10,9 g/t
% Total de recuperación de oro	75%
Recuperación total de oro	8,18 g/t

## 9.2.1.1. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

### Activos fijos

La inversión en activos fijos está representada en la adquisición de maquinaria y equipo, tanto para las operaciones de extracción del material de mina como para las operaciones unitarias del proceso de beneficio (incluyendo el costo de instalaciones eléctricas e hidráulicas para su funcionamiento) y el costo del montaje del laboratorio.

#### • Maquinaria y equipo

Con el fin de implementar los nuevos procesos que se detallan en la ruta metalúrgica contenida en esta guía se ha incluido este rubro, que comprende el costo de la maquinaria y los equipos que se deben adquirir para mejorar algunos de los procesos que se están llevando a cabo en la operación de extracción del mineral y en la planta de beneficio”.

Para la definición de la maquinaria y los equipos que deben comprarse se partió del inventario inicial de las minas y plantas de la zona, con el objetivo de no incurrir en costos innecesarios y así optimizar los recursos disponibles.

En la siguiente tabla se detalla la maquinaria y los equipos nuevos que se requieren para mejorar las operaciones en la fase de extracción del mineral, de acuerdo con las condiciones e inventario actual de las minas de la zona.

Figura 9.2. Maquinaria y equipos nuevos para la fase de extracción del mineral. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN DE MAQUINARIA Y EQUIPO	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
Perforadora neumática	26 kg	2
Picador neumático	8,5 kg	2
Rotomartillo eléctrico	599 x 134 x 287 mm	2
Ventiladores axiales	90 m <sup>3</sup> /minuto	2
Extractor, ventilador axial	45 m <sup>3</sup> /minuto	1
Compresor portátil diésel	Unidad compresora 5 años (10.000 horas)	1
Planta eléctrica diésel doméstica	5,5 kW	1
Bomba autocebante	1,5 hp	2
Bomba sumergible	1,5 hp	1
Malacate con motor	Motor de 5 hp	2

**La puesta en marcha de la propuesta de modernización requiere la compra total de la maquinaria que se relaciona enseguida. Estas especificaciones técnicas corresponden al volumen de material mineral que se debe extraer por día y a la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio definida por el equipo técnico.**

De igual manera, en la figura 9.3. se relaciona la maquinaria y los equipos nuevos que deberán ser adquiridos para la implementación de la ruta metalúrgica 1.

#### • Instalaciones eléctricas e hidráulicas

Este rubro comprende el costo de materiales y el pago de honorarios del personal calificado que llevará a cabo las adecuaciones eléctricas e hidráulicas necesarias para la instalación y puesta en funcionamiento de la maquinaria y los equipos nuevos.

#### • Montaje de laboratorio

Este rubro comprende el costo del montaje del laboratorio requerido para obtener información oportuna y veraz acerca de la eficiencia de las operaciones implicadas en el proceso, y de los impactos ambientales de tipo químico que se estén causando con el proceso de beneficio.

Figura 9.3. Maquinaria y equipos nuevos para la implementación de la ruta metalúrgica 1. Fuente: autores.

PROCESOS	MÁQUINA Y DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Tolva para almacenar material de mina	4 m x 4m x 2m	1
	Trituradora de quijadas	10" x 16"	1
	Criba vibratoria	1,20 x 2,40	1
	Trituradora de martillos	24" x 10"	1
	Banda transportadora con estructura de soporte (20 metros)	18"	1
	Tolva para material triturado	4 m x 4m x 2m	1
	Caja de pulpa	0,80m x 0,80m x 1m	3
	Bomba de sólidos	2,5" x 2"	3
	Hidrociclón 1	4"	1
	Hidrociclón 2	4"	1
	Hidrociclón 3	4"	1
Molino de bolas primario	4" x 5" - 1,20 x 1,50	1	
Molino de bolas secundario	1,0 m x 2,5 m	2	
CONCENTRACIÓN	JIG	8 X 12 dúplex	1
	Concentrador Centrifugo	2t/h	2
	Mesa gemini de refinación	40kg/h	1
	Tanque espesador	2,5 m	2
CIANURACIÓN	Tanques de cianuración agitada	D=3m, H=3m	1
	Tanque para precipitación de oro en cinc	D= 3m, H=3,5m	1
	Precipitación, sistema merril crowe	5 a 10 m <sup>3</sup> /hora	1
	Sistema de aire	2,5 HP	1
FUNDICIÓN	Horno con crisol	Capacidad de 15 kg	1
MANEJO AMBIENTAL	Bomba para soluciones de 2" X 1,5" de alta	5 HP	1
	Bomba para soluciones de 2" X 1,5" de baja	2 HP	1
	Bomba sumergible	2 HP	1
	Tanque en lámina	Capacidad de 30 m <sup>3</sup>	1
	Tanques auxiliares en propileno	1000 L	1
	Tanque auxiliares en lámina para neutralización	D= 3m, H=3,5m	1
	Tanque reactor	D=3m, H=3m	1
	Filtro prensa	35 marcos	1

**El monto de las inversiones que se requieren para mejorar las operaciones en la fase de extracción del mineral y la adecuación de la planta de beneficio (maquinaria y equipo, instalaciones eléctricas e hidráulicas y montaje de laboratorio) dependerá de las características de cada mina y de cada planta, así como de la negociación del minero con su proveedor.**

## Activos diferidos

La adquisición del siguiente activo diferido está sujeta a las condiciones propias de cada unidad de explotación.

- **Licencia ambiental**

Este rubro comprende el costo de los estudios previos que se deben realizar para tramitar la solicitud de la licencia ambiental y el valor que se debe pagar a la autoridad ambiental competente, una vez sea aprobada la licencia.

### 9.2.1.2. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE COSTOS DE LA FASE DE EXTRACCIÓN

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente cada uno de los costos directos de la fase de extracción del material de mina.

### Costos directos de la fase de extracción

Los costos directos de la fase de extracción del mineral tienen que ver con la adquisición de insumos (partes, accesorios, herramientas, suministros, combustible y explosivos), la compra de elementos de seguridad industrial, la contratación de mano de obra, el mantenimiento de maquinaria y equipos, el pago de energía eléctrica y la depreciación de bienes físicos.

- **Insumos para la fase de extracción**

Respecto al rubro de insumos, se tiene en cuenta el costo mensual de la adquisición de partes y accesorios de la maquinaria y los equipos, las herramientas y los suministros para la extracción, y el combustible y los explosivos utilizados.

En las siguientes tablas se muestra el detalle de los insumos que se utilizan en las operaciones de extracción del material de mina, de acuerdo con los metros de avance en la explotación definidos previamente por el equipo técnico (26 metros de avance mensual, según variables de operación de la mina y de la planta típicas de la zona).

- **Mano de obra para la fase de extracción**

En este rubro se cuantifica el pago mensual de los salarios del personal vinculado a la operación de extracción del mineral, los aportes a seguridad social que deben ser asumidos por el empleador con base en la Ley 100 de 1993 (salud, pensión y ARL), los aportes parafiscales que deben destinarse al Instituto de Bienestar Familiar (ICBF), al SENA y a las cajas de compensación familiar (CCF), así como

### Para el desarrollo de la explotación minera y el beneficio de oro se debe contar con dos criterios básicos: a) trabajar bajo el amparo de un título minero, y b) contar con licencia ambiental.

Figura 9.4. Insumos para la fase de extracción. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
<b>PARTES Y ACCESORIOS</b>	
Acople 3/4 espigo	2 unidades
Acople 3/4 macho	2 unidades
Acople 3/4 macho	2 unidades
Abrazadera 3/4	2 unidades
Barra de avance	1 unidad
Broca helicoidal SDS Max Diager 32 x 690	3 unidades
Broca helicoidal SDS Max Diager 1.174 x 36 (32 x 920 mm)	3 unidades
Barrena integral Sandvik de 3" (0,80 cm)	2 unidad
Barrena integral Sandvik de 3" (1,20 cm)	2 unidad
<b>HERRAMIENTAS Y SUMINISTROS</b>	
Carretas	1 unidad
Palas	4 unidades
Picas	4 unidades
Manguera de 1" para aire comprimido	44 metros
Manguera de 1" para agua	44 unidades
Tablón de madera x 2 mts	30 tablonos
Palancas de madera	26 unidades
Cable encauchetado 2" x 12"	44 metros
Toma eléctrica	2 unidades
Clavos de acero de 3"	1 caja x 25
Tubo de PVC	24 metros
Clavija	2 unidades
Bombillos de litio	8 unidades
Aceite Mobil Almo 527	2 unidades
Ducto plástico para ventilador (mangas)	2 unidades
<b>COMBUSTIBLE Y EXPLOSIVOS</b>	
Combustible diésel	208 galones
Indugel Plus AP (26 x 250 mm) caja x 25 kg*	203 kg
Anfo Rezar, bulto de 25 kg*	125 kg
Detonador común n.º 8 (caja de 100 unidades)*	1.248 unidades
Mecha lenta de seguridad (caja por 500 metros)*	3.120 metros

\*En este rubro se tiene en cuenta el costo adicional mensual que representa el pago del traslado de los explosivos con escolta, desde el punto de venta hasta la mina.

la respectiva provisión mensual para el pago de las prestaciones sociales (prima, vacaciones, cesantías e intereses de cesantías).

- **Salarios de los empleados**

El costo de mano de obra se calcula para un total de diez empleados, conforme a la distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, que se muestran en la siguiente tabla:

Figura 9.5. Distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, fase de extracción. Fuente: autores.

PROCESO	CARGO	CANTIDAD DE OPERARIOS	TORNOS X DÍA	SUELDO BÁSICO X MES (COP)	AUX. TRANSPORTE X MES (COP)	SALARIO TOTAL X MES (COP)*
Frete de explotación	Operario	4	1	828.116	97.032	3.700.592
Carga y transporte	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Preparación	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Desarrollo	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
General	Supervisor	1	1	828.116	97.032	925.148
<b>Total</b>		<b>10</b>				<b>9.251.480</b>

\* El salario total asignado a los operarios y el supervisor corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019.

### Aportes al Sistema General de Seguridad Social

El cálculo de aportes a cargo del empleador, con destino al Sistema General de Seguridad Social (SGSS), se realizó con base en los sueldos básicos por mes que se indicaron en la tabla anterior.

Fórmula para calcular los aportes a seguridad social (SGSS)

**Aportes a seguridad social (\$/mes) = sueldo básico (\$) × % aportes (EPS, pensión, ARL)**

- **Aportes parafiscales**

El cálculo de aportes parafiscales que corresponden a una contribución obligatoria del empleador con destino al Servicio Nacional de Aprendizaje, al Instituto Colombiano de Bienestar Familiar y a las cajas de compensación familiar, con el propósito de que dicho aporte permita a estas entidades ejecutar las labores para las cuales fueron creadas, se estimó conforme a los salarios básicos asignados a los empleados.

Fórmula para calcular los aportes a parafiscales  
**Aportes parafiscales (\$/mes) = sueldo básico (\$) × % aporte (SENA, ICBF, CCF)**

- **Prestaciones sociales**

El cálculo de la provisión mensual sobre el valor de la nómina, para el pago de prestaciones sociales a los trabajadores, se estimó con base en el salario mensual total asignado a cada operario.

Fórmula para calcular la provisión para pago de prestaciones sociales

**Provisión (\$/mes) = salario total (\$) × % de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)**

Figura 9.6. Tablas de aportes a seguridad social y parafiscales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTE SGSS COP (\$)	DESCRIPCIÓN
EPS (salud)	\$ 70.390	Aporte total (12,5%): \$ 103.515 Aporte del empleador (8,5%): \$70.390 Aporte del trabajador (4%): \$33.125
Pensión (AFP)	\$ 99.374	Aporte total (16%): \$ 132.499 Aporte empleador (12%): \$99.374 Aporte trabajador (4%): \$33.125
ARL	\$ 57.637	Aporte total Riesgo V (6,96%): \$57.637 Aporte empleador: \$57.637
<b>Total:</b>	<b>\$ 227.401</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en la Ley 100 de 1993.

CONCEPTO	APORTES PARAFISCALES COP(S)	DESCRIPCIÓN
Caja de compensación familiar	\$ 33.125	Aporte total al CCF: (4%) a cargo del empleador
ICBF	\$ 24.843	Aporte total al ICBF: (3%) a cargo del empleador
SENA	\$ 16.562	Aporte total al SENA -: (2%) a cargo del empleador
<b>Total:</b>	<b>\$ 74.530</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en los porcentajes establecidos en el Código Sustantivo del Trabajo.

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

**Provisión para pago de intereses de cesantías (\$/mes) = cesantías (\$) x 12%**

• **Elementos de protección personal para la fase de extracción**

Este rubro comprende el costo de la adquisición de los elementos que conforman el equipo de protección personal de los operarios de la mina.

Para calcular este costo se consideró la frecuencia de compra de los elementos y las respectivas cantidades, para establecer un factor de conversión que permitiera convertir el costo total en un costo mensual. Lo anterior, teniendo en cuenta que estos elementos tienen frecuencia de compra diferente.

La figura 9.8 contiene el detalle de los elementos de protección personal que se requieren para garantizar la seguridad de los trabajadores de la mina.

• **Mantenimiento de los bienes físicos para la fase de extracción**

En este rubro se cuantifican todos los gastos necesarios para conservar la maquinaria y los

Figura 9.7. Tablas de aportes a prestaciones sociales. Fuente: autores.

CONCEPTO	PRESTACIONES SOCIALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Cesantías (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Intereses de cesantías (12%)	\$ 9.251	(12 %): corresponde al 12 % sobre el valor a pagar de las cesantías
Prima de servicios (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Vacaciones (4,17%)	\$ 38.579	(4,17 %): la ley del trabajo establece 15 días hábiles consecutivos de vacaciones anuales remuneradas
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 201.960</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en Ley 1607 de 2012.

**El cálculo de los aportes al SGSS y de las contribuciones parafiscales se debe realizar sobre la base del sueldo básico, es decir, sin tener en cuenta el auxilio de transporte, en tanto que la liquidación de las prestaciones sociales se debe tomar como base del cálculo del salario total, esto es, el sueldo básico más el auxilio de transporte.**

Figura 9.8. Elementos de protección personal para trabajadores en mina. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA DE COMPRA	CANTIDAD*
Arnés en X Expert Line	Quinquenal	10 unidades
Línea de vida de 16 mm, 50 metros	Quinquenal	10 unidades
Cargador individual CH	Anual	15 unidades
Lámpara KL5LM naranja 8,000 lux	Anual	15 unidades
Cargador para lámpara	Anual	4 unidades
Lámpara KL4MS	Anual	4 unidades
Casco con portálámpara	Anual	15 unidades
Overol tipo piloto con cinta	Cuatrimestral	30 unidades
Cinturón minero de nylon con anillo	Cuatrimestral	10 unidades
Bota de seguridad exportadora	Cuatrimestral	15 unidades
Bota conga II	Cuatrimestral	15 unidades
Fono Samuray (protector auditivo externo)	Cuatrimestral	15 unidades
Conjunto de dos 2 piezas de ajuste en broche (impermeable)	Cuatrimestral	15 unidades
Respirador media cara 7500	Cuatrimestral	15 unidades
Guante de nylon en de nitrilo	Mensual	20 unidades
Filtros para partículas 7993B A/E 110167-5	Mensual	20 unidades
Lente Nitro II AF 110005-0	Mensual	15 unidades
Protector reusable Libus - Reflex bolsa (protector auditivo de inserción)	Mensual	20 unidades

\* Las cantidades se determinaron para un total de 10 empleados.

equipos en buenas condiciones, a efectos de que trabajen con rendimiento normal durante su vida útil y prolonguen sustancialmente su tiempo de uso.

El costo del mantenimiento de la maquinaria y de los equipos se estableció como un porcentaje equivalente a 0,75% del valor comercial de la maquinaria (este valor incluye el costo del mantenimiento preventivo y correctivo y la compra de repuestos).

Fórmula para calcular el costo de mantenimiento

**Costo de mantenimiento (\$) = valor comercial total (\$) x 0,75%**

• **Costo de energía eléctrica para la fase de extracción**

En este rubro se cuantifica el costo de la energía eléctrica mensual que se consume en el proceso de extracción del mineral.

El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados para la extracción del mineral y el número de horas al día durante las cuales se utilizarían, de acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos.

El costo total por energía eléctrica mensual se calcula con base en el consumo en kWh/mes, y la tarifa por kW que se paga a la empresa que suministra el servicio.

Fórmula para calcular el costo mensual de energía eléctrica

**Costo de la energía eléctrica (\$) = consumo energía (kWh/mes) x tarifa kW (\$)**

Figura 9.9. Consumo de energía eléctrica por equipo. Fuente: autores.

EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA DE MOTOR hp	POTENCIA Kw	POTENCIA EFECTIVA Kw	HORAS TRABAJO	Kw/DÍA	Kw/MES
Rotomartillo eléctrico	2	2	1.5	1.20	8	19.2	499.2
Ventiladores axial	2	2	1.5	1.20	8	19.2	499.2
Bomba sumergible	1	1.5	1.125	0.90	8	7.2	187.2
Extractor ventilador axial	1	2	1.5	1.20	8	9.6	249.6
Motor malacate	2	3	2.25	1.80	8	28.8	748.8
<b>Total:</b>						<b>84</b>	<b>2,184</b>

La figura 9.9. contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

• **Depreciación de maquinaria y equipo para la fase de extracción**

En este rubro se valora la reducción del valor de la maquinaria como consecuencia de su uso. Debe tenerse en cuenta que, pese a que la depreciación no representa una salida de efectivo, este mecanismo debe considerarse a efectos de recuperar la inversión en activos fijos.

El valor de depreciación mensual de cada equipo se estimó por medio del método en línea recta, utilizando como referencia un tiempo de vida útil de diez años.

Fórmula para calcular la depreciación de la maquinaria y equipo

**Costo depreciación (\$) = valor comercial del equipo (\$) / tiempo de vida útil (meses)**

**El método de línea recta está reconocido por la DIAN para descontar el valor de la depreciación de la base de cálculo del impuesto de renta y complementarios.**

### 9.2.1.3. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE COSTOS DE LA FASE DE BENEFICIO

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente cada uno de los costos (directos e indirectos) de la operación de la planta de beneficio, conforme a la ruta metalúrgica propuesta.

De acuerdo con el diagrama de operaciones de la ruta metalúrgica propuesta (figura 8.25.), los costos de operación se cuantificaron y clasificaron para cada uno de los siguientes procesos:

- Trituración y molienda
- Concentración (gravimétrica y por flotación)
- Cianuración
- Fundición
- Manejo ambiental

#### Costos directos de la fase de beneficio

Los costos directos del proceso de beneficio tienen que ver con la adquisición de materia prima e insumos, la contratación de mano de obra, el mantenimiento de maquinaria y equipos, análisis y pruebas de laboratorio, pago de servicios públicos (energía eléctrica y agua) y depreciación de bienes físicos.

- **Materia prima para la fase de beneficio-costo de extracción**

El costo de materia prima corresponde al valor que se debe pagar por cada tonelada de material mineral puesto en tolva. En este ejercicio, el costo de la materia prima se define como el costo de extracción del mineral, el cual incluye los rubros mencionados en la sección 9.2.1.2, “Identificación y valoración de costos de la fase de extracción”.

Figura 9.10. Insumos para la fase de beneficio. Fuente: autores.

PROCESOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CONSUMO / TONELADA*	CONSUMO MENSUAL**
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Cuerpos molidores	kg	1,2	250
	Revestimientos trituradora primaria	kg	1,2	250
	Revestimientos trituradora secundaria	kg	1,2	250
	Revestimientos de molino primario	kg	1,2	250
	Revestimientos de molino secundario	kg	1,2	250
CIANURACIÓN***	Cianuro de sodio (NaCN)	kg	12	12.019
	Cal (CaO)	kg	7	738
	Hidróxido de sodio (potasa)	kg	0,0391	627
	Acetato de plomo	kg	0,003	29.595
	Polvo de zinc	kg	0,024	20.230
	Xelite (diatomita)	kg	0,013	5.891
FUNCION	Bórax Pentahidratado	kg	0,044	9
	Carbonato de sodio	kg	0,008	2
	Sílice - Cuarzo	kg	0,025	5
MANEJO AMBIENTAL	Floculante	kg	0,004	1
	Ácido sulfúrico	kg	0,300	62
	Peróxido de hidrógeno	kg	0,269	56

\* La dosificación por tonelada fue determinada por el equipo técnico. \*\* La cantidad consumida mensualmente se estimó para 208 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta. \*\*\* La cantidad de mineral que va a cianuración corresponde al 8% del material de cabeza.

Debe tenerse en cuenta que en la estimación de los costos totales de la fase de beneficio, al costo de extracción por cada tonelada de material procesado se le descuenta el valor de la depreciación de los bienes físicos y maquinaria utilizados en esta fase, a efectos de facilitar la sistematización de la información en el flujo de caja del proyecto.

- **Insumos para la fase de beneficio**

Respecto al rubro de insumos, se tiene en cuenta el costo de los reactivos y elementos químicos que se emplean en cada proceso, según se detalla en la figura 9.10.

- **Mano de obra para la fase de beneficio**

En este rubro se cuantifica el pago mensual de los salarios del personal vinculado a la operación de beneficio, los aportes a seguridad social que deben ser asumidos por el empleador con base en la Ley 100 de 1993 (salud, pensión y ARL), los aportes parafiscales que deben destinarse al Instituto de Bienestar Familiar (ICBF), al SENA y a las cajas de compensación familiar (CCF), así como la respectiva provisión mensual para el pago de las prestaciones sociales (prima, vacaciones, cesantías e intereses de cesantías).

#### Salarios de los empleados

El costo de mano de obra se calcula para un total de nueve empleados, conforme a la distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, que se muestran en la siguiente tabla:

Figura 9.11. Distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, fase de beneficio. Fuente: autores.

PROCESO	CARGO	CANTIDAD DE OPERARIOS	TURNOS X DÍA	SUELDO BÁSICO X MES (COP)	AUX. TRANSPORTE X MES (COP)	SALARIO TOTAL X MES (COP)*
Trituración	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
Molienda	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
Concentración	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Cianuración y fundición	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
<b>Total</b>		<b>5</b>				<b>4.625.740</b>

\* El salario total asignado a los operarios y el supervisor corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia durante 2019.

- **Aportes al Sistema General de Seguridad Social**

El cálculo de aportes a cargo del empleador, con destino al Sistema General de Seguridad Social (SGSS) se realizó con base en los sueldos básicos por mes que se indicaron en la tabla anterior.

Fórmula para calcular los aportes a seguridad social

$$\text{Aportes a seguridad social (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aportes (EPS, pensión, ARL)}$$

- **Aportes parafiscales**

El cálculo de aportes parafiscales que corresponden a una contribución obligatoria del empleador con destino al Servicio Nacional de Aprendizaje, al Instituto Colombiano de Bienestar Familiar y a las cajas de compensación familiar, con el propósito de que dicho aporte permita a estas entidades ejecutar las labores para las cuales fueron creadas, se estimó conforme a los salarios básicos asignados a los empleados.

$$\text{Fórmula para calcular los aportes a parafiscales} \\ \text{Aportes parafiscales (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aporte (SENA, ICBF, CCF)}$$

Figura 9.12. Tablas de aportes a seguridad social y parafiscales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTE SGSS COP (\$)	DESCRIPCIÓN
EPS (salud)	\$ 70.390	Aporte total (12,5%): \$ 103.515 Aporte del empleador (8,5%): \$70.390 Aporte del trabajador (4%): \$33.125
Pensión (AFP)	\$ 99.374	Aporte total (16%): \$ 132.499 Aporte empleador (12%): \$99.374 Aporte trabajador (4%): \$33.125
ARL	\$ 57.637	Aporte total Riesgo V (6,96%): \$57.637 Aporte empleador: \$57.637
<b>Total:</b>	<b>\$ 227.401</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en la Ley 100 de 1993.

- **Prestaciones sociales**

El cálculo de la provisión mensual sobre el valor de la nómina, para el pago de prestaciones sociales a los trabajadores, se estimó con base en el salario mensual total asignado a cada operario.

Fórmula para calcular la provisión para pago de prestaciones sociales

**Provisión (\$/mes) = salario total (\$) × % de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)**

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

**Provisión para pago de intereses de cesantías (\$/mes) = cesantías (\$) × 12%**

- **Mantenimiento de los bienes físicos de la fase de beneficio**

En este rubro se cuantifican todos los gastos necesarios para conservar la maquinaria y los equipos de la planta de beneficio en buenas condiciones, a efectos de que trabajen con rendimiento normal durante su vida útil.

El costo del mantenimiento de la maquinaria y de los equipos se estableció como un porcentaje equivalente a 0,75% del valor comercial de la maquinaria (este valor incluye el costo del mantenimiento preventivo y correctivo y la compra de repuestos).

Fórmula para calcular el costo de mantenimiento

**Costo de mantenimiento (\$) = valor comercial total (\$) × 0,75%**

- **Análisis y pruebas de laboratorio de la fase de beneficio**

Este rubro comprende el costo de los ensayos de laboratorio que deben realizarse cada mes con el objetivo de disponer de información oportuna y veraz acerca de la eficiencia de las operaciones en cada uno de los procesos, así como de los impactos ambientales de tipo químico que se estén generando.

En la siguiente tabla se relacionan los tipos de ensayos, tipos de muestras y cantidades mínimas que se deben realizar en cada mes de la operación.

Figura 9.13. Tablas de aportes a prestaciones sociales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTES PARAFISCALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Caja de compensación familiar	\$ 33.125	Aporte total al CCF: (4%) a cargo del empleador
ICBF	\$ 24.843	Aporte total al ICBF: (3%) a cargo del empleador
SENA	\$ 16.562	Aporte total al SENA -: (2%) a cargo del empleador
<b>Total:</b>	<b>\$ 74.530</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en los porcentajes establecidos en el Código Sustantivo del Trabajo.

CONCEPTO	PRESTACIONES SOCIALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Cesantías (8,33%)	\$ 77.065	(8,33%): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Intereses de cesantías (12%)	\$ 9.251	(12%): corresponde al 12% sobre el valor a pagar de las cesantías
Prima de servicios (8,33%)	\$ 77.065	(8,33%): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Vacaciones (4,17%)	\$ 38.579	(4,17%): la ley del trabajo establece 15 días hábiles consecutivos de vacaciones anuales remuneradas
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 201.960</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en Ley 1607 de 2012.

**El cálculo de los aportes al SGSS y de las contribuciones parafiscales se debe realizar sobre la base del sueldo básico, es decir, sin tener en cuenta el auxilio de transporte, en tanto que la liquidación de las prestaciones sociales se debe tomar como base del cálculo del salario total, esto es, el sueldo básico más el auxilio de transporte.**

## Servicios públicos de la fase de beneficio

Es necesario precisar que en los costos indirectos de fabricación (CIF) usualmente se tienen en cuenta los costos de los servicios públicos. Sin embargo, en este ejercicio financiero se clasifica el costo del consumo de agua y energía como costos directos del proceso de operación, con el objetivo de establecer un punto de referencia para evaluar el aumento de consumo de energía que se generaría en la planta, a partir de la implementación de la propuesta tecnológica, y estimar el costo del consumo de agua en el proceso de beneficio.

Figura 9.14. Análisis y pruebas de laboratorio de la fase de beneficio. Fuente: autores.

PROCESOS	TIPO DE ENSAYO	TIPO DE MUESTRA	CANTIDAD (UNIDAD/MES)
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Ensayos al fuego	Cabeza general	26
	Ensayos al fuego	Cola de flotación	26
CONCENTRACIÓN	Ensayos al fuego	Concentrado de mesa	26
	Ensayos al fuego	Superconcentrado	8
	Ensayos al fuego	Fundido	8
CIANURACIÓN	Ensayos al fuego	Cola de cianuración	26
	Absorción atómica	Oro en solución de cianuración	52
	Absorción atómica	Oro en solución pobre	26
	Absorción atómica	Cinc en solución pobre	2
	Absorción atómica	Cobre en solución	2
MANEJO AMBIENTAL	Absorción atómica	Ambientales	4

- **Costo de energía eléctrica**

En este rubro se cuantifica el costo de la energía eléctrica que se consume mensualmente en el proceso de beneficio.

El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la planta y el número de horas al día durante las cuales se utilizarían, de acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la planta de beneficio. La siguiente tabla contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

El costo total por energía eléctrica mensual se calcula con base en el consumo en kWh/mes, y la tarifa por kW que se paga a la empresa que suministra el servicio.

Figura 9.15. Consumo de energía por equipos de la fase de beneficio. Fuente: autores.

	EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA DE MOTOR		POTENCIA EFECTIVA Kw	HORAS TRABAJO	Kw/DÍA	Kw/MES
			hp	Kw				
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Trituradora de quijadas	12	9,00	7,20	1	8	57,6	1.498
	Criba vibratoria	2	1,50	1,20	1	8	9,6	250
	Trituradora de martillos	25	18,75	15,00	1	8	120	3.120
	Banda transportadora	3	2,25	1,80	1	8	14,4	374
	Molino de bolas primario	30	22,50	20,25	1	8	162	4.212
	Molino de bolas secundario	25	18,75	16,88	2	8	270	7.020
	Bomba de Sólidos	7,5	5,63	4,50	3	8	108	2.808
	<b>Total trituración y molienda</b>							<b>19.282</b>
CONCENTRACIÓN	JIG	2	1,5	1,20	1	8	9,6	250
	Concentrador centrífugo	2	1,5	1,20	2	8	19,2	499
	Mesa gemini de refinación	1	0,75	0,60	1	8	4,8	125
	Tanque espesador	2	1,5	1,20	2	8	19,2	499
<b>Total concentración</b>							<b>1.373</b>	
CIANURACIÓN	Tanque de agitación (lixiviación)	12	9	7,20	1	24	172,8	4.493
	Precipitación, sistema Merrill Crowe	14	10,5	8,40	1	8	67,2	1.747
	Compresor	2,5	1,875	1,50	1	24	36	936
<b>Total cianuración</b>							<b>7.176</b>	
MANEJO AMBIENTAL	Tanque de agitado para neutralización	12	9	7,20	1	8	57,6	1.498
	Bombas para recirculación de aguas y soluciones	5	3,75	3,00	3	8	72	1.872
<b>Total manejo ambiental</b>							<b>3.370</b>	
							<b>Total</b>	<b>31.200</b>

Fórmula para calcular el costo mensual de energía eléctrica

**Costo de la energía eléctrica (\$) = consumo energía (kW-h/mes) × tarifa kW (\$)**

- **Costo del agua**

En este rubro se cuantifica el costo por consumo de agua en el proceso de beneficio de la planta, de acuerdo con la tarifa reportada por la empresa prestadora del servicio en la zona.

Para determinar la cantidad de agua que se consume en el proceso de beneficio de la planta, el equipo técnico realizó un ejercicio experimental basándose en un balance hídrico de masa, mediante el cual se logró establecer que el consumo específico de agua por tonelada de mineral procesado es de 0,53 m3.

Fórmula empleada para calcular el costo mensual de agua

**Costo del agua (\$) = consumo de agua (m³/mes) × tarifa m³ (\$)**

## Depreciación de la maquinaria y el equipo para la fase de beneficio

En este rubro se valora la reducción en el valor de la maquinaria como consecuencia de su uso. Debe tenerse en cuenta que, pese a que la depreciación no representa una salida de efectivo, este mecanismo debe considerarse a efectos de recuperar la inversión en activos fijos.

El valor de depreciación mensual de cada equipo se estimó por medio del método en línea recta, utilizando como referencia un tiempo de vida útil de diez años.

Fórmula para calcular la depreciación de la maquinaria y el equipo

**Costo depreciación (\$) = valor comercial del equipo (\$) / tiempo de vida útil (meses)**

## Costos indirectos de la fase de beneficio

En este análisis, los costos indirectos de fabricación (CIF) se calculan en un 10% de la suma de los costos directos de la planta de beneficio.

Fórmula para calcular los CIF

**CIF (\$) = valor de costos directos (\$) × 10%**

## Costos totales de la fase de beneficio

Los costos totales de la operación mensual de la planta de beneficio se determinan mediante la suma de los costos directos e indirectos.

Fórmula para calcular el costo total

**Costos totales mensuales (\$) = total de los costos directos mensuales (\$) + total de los costos indirectos mensuales (\$)**

### 9.2.1.4. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE INGRESOS DE OPERACIÓN

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente los ingresos mensuales que se obtienen de la operación de la planta de beneficio después de la implementación de la ruta metalúrgica 1. Para esto se debe multiplicar la cantidad de oro producido en gramos por el precio al que se vende cada gramo de oro.

La cantidad de oro recuperado se halla mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

Fórmula para calcular la cantidad de oro por tonelada procesada

**Oro recuperado por tonelada (g) = tenor (g) × % de recuperación total**

Figura 9.16. Recuperación de oro en la fase de beneficio. Fuente: autores.

CANTIDAD DE MATERIAL PROCESADO (t)	TENOR	RECUPERACIÓN TOTAL (%)*	CANTIDAD RECUPERADA (g/t**)
1	10,9	100	10,9
1	10,9	75%	8,18

\* Con la implementación de la propuesta tecnológica se puede alcanzar mínimo un 75 % de recuperación de oro por tonelada. \*\* Para la zona minera de Puerto Libertador (unidad geometalúrgica 1) se determinó que el tenor es de 7,9 gramos, por tonelada. Sin embargo, el tenor de corte bajo el cual es rentable la operación de la ruta metalúrgica sugerida es de mínimo 10,9 gramos por tonelada.

Una vez se ha determinado la cantidad de oro recuperado por cada tonelada de mineral procesada, se emplea la siguiente fórmula para establecer la cantidad de oro que se produce en un mes:

Fórmula para calcular la producción mensual de oro

**Producción mensual de oro (g) = oro recuperado por tonelada (g) × mineral procesado mensualmente (t)**

Finalmente, se utiliza la siguiente fórmula para determinar los ingresos mensuales por la venta de oro producido:

Fórmula para calcular los ingresos mensuales por venta de oro

**Ingresos totales mensuales (\$) = producción mensual de oro (g) × precio del oro (\$/g)**

## 9.2.2. EVALUACIÓN FINANCIERA

En esta sección se expone la metodología que se emplea en las dos etapas de la evaluación financiera y se presentan los supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de ingresos y costos de operación durante el horizonte definido para la evaluación del proyecto.

Recordemos que la evaluación financiera de proyectos comprende esencialmente dos etapas: la construcción del flujo de caja del proyecto y la aplicación de métodos de evaluación para establecer la conveniencia de emprender o no un proyecto.

### 9.2.2.1. CONSTRUCCIÓN DEL FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

El tiempo definido para medir la bondad financiera del proyecto, u horizonte de evaluación del proyecto, es de cinco años.

A continuación se explican cada uno de los componentes del flujo de caja y los supuestos que se utilizaron para la proyección de ingresos y costos de operación de la planta de beneficio en cada uno de los años que comprende el horizonte de evaluación.

#### Inversión inicial

El monto de la inversión inicial se registra en la estructura del flujo de caja en el año cero. Esto se debe a que la inversión se realiza antes de poner en marcha el proyecto.

#### Ingresos gravables

Los ingresos gravables que se registran en el flujo de caja del proyecto son los mismos ingresos operacionales que resultan de la venta de oro producido en cada año.

- **Supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de los ingresos gravables**

La producción anual se mantiene constante en el horizonte de evaluación del proyecto (cada año se produce la misma cantidad de oro). A partir del segundo año, el precio del oro aumenta en una proporción del 3% anual.

Fórmula para calcular los ingresos gravables anuales

**Ingresos gravables en el año 1 (\$) = producción de oro en el año 1 (g) × precio del oro en el año 1 (\$/g)**

## Egresos deducibles

Los egresos deducibles que se registran en el flujo de caja del proyecto son los costos de operación, la depreciación y el pago de regalías.

La tasa para la liquidación de regalías por explotación de oro es del 4% sobre la producción en boca de mina, según lo establece el artículo 16 de la Ley 756 de 2002.

Fórmula para la liquidación de las regalías

**Regalías del año 1 (\$) = (producción de oro el año 1 (g) × precio fijado por el Banco de la República en el año 1 (\$/g) × 4%**

- **Supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de los egresos deducibles**

1. A partir del 2.º año, el costo de la materia prima (representado en el costo de extracción) aumenta en una proporción del 3% anual
2. A partir del 2.º año, el costo de los insumos aumenta en una proporción del 2% anual
3. A partir del 2.º año, el costo de mano de obra aumenta en una proporción del 4% anual
4. A partir del 2.º año, el precio para la liquidación de las regalías aumenta en una proporción de 3% anual

Los demás costos de operación (mantenimiento, análisis y pruebas de laboratorio, servicios públicos y costos indirectos de fabricación) permanecen constantes en el horizonte de evaluación del proyecto, es decir que para cada año el costo en estos rubros es el mismo.

## Utilidad operacional

La utilidad operacional es la ganancia obtenida por la empresa, antes del pago de impuestos.

Fórmula para calcular la utilidad antes de pagar impuestos

**Utilidad operacional del año 1 (\$) = ingresos gravables en el año 1 (\$) – egresos deducibles en el año 1 (\$)**

## Margen de utilidad operacional

Este indicador determina el porcentaje que queda por cada peso de venta después de deducir todos los costos y gastos de la operación de la planta de beneficio.

Fórmula para calcular el margen de utilidad operacional

**Margen de utilidad operacional del año 1 (%) = (utilidad operacional en el año 1 (\$) / ingresos gravables en el año 1 (\$)) × 100**

---

**Las regalías corresponden a una contraprestación económica que debe reconocerse al Estado por la explotación de un recurso natural no renovable. En este caso, las regalías se pagan por la producción de oro, debido a que después de beneficiar el mineral este no se regenera. De conformidad con los artículos 58, 332 y 360 de las Constitución Política de Colombia de 1991, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación económica.**

---

## Impuestos

En el flujo de caja del proyecto se debe estimar el impuesto de renta, que corresponde a una contribución que grava el ingreso de las personas y entidades económicas. Este impuesto sobre la renta incluye el gravamen al trabajo, al capital y la combinación de ambos (Glosario minero, 2017).

En la última reforma tributaria, contenida en la Ley 1819 del 29 de diciembre de 2016, se estableció el 33% como tarifa general del impuesto de renta para las personas jurídicas.

Debe tenerse en cuenta que en el momento de la liquidación del impuesto de renta se toman como base los ingresos gravables generados en el último año y se descuenta el monto correspondiente a los costos de operación, o egresos deducibles.

Fórmula para calcular el impuesto de renta

**Impuesto de renta del año 1 (\$) = utilidad antes de pagar impuestos del año 1 (\$) × 33%**

## Utilidad neta

La utilidad neta es la ganancia obtenida por la empresa después de haber pagado impuestos.

Fórmula para calcular la utilidad neta

**Utilidad neta del año 1 (\$) = utilidad operacional del año 1 (\$) – impuesto de renta del año 1 (\$)**

## Margen de utilidad neta

Este indicador determina el porcentaje que queda por cada peso de venta después de deducir todos los costos y gastos de la operación de la planta de beneficio, incluido el pago de impuesto de renta.

Fórmula para calcular el margen de utilidad neta

**Margen de utilidad neta del año 1 (%) = (utilidad neta del año 1 (\$) / ingresos gravables en el año 1 (\$)) × 100**

## Flujo neto de efectivo

Los flujos netos de efectivo son los beneficios futuros que genera el proyecto en cada año que comprende el horizonte de evaluación.

Fórmula para calcular el flujo neto de efectivo

**Flujo neto de efectivo en el año 1 (\$) = utilidad neta en el año 1 (\$) + depreciación en el año 1 (\$)**

## 9.2.2.2. APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUAR PROYECTOS

Enseguida se presentan las fórmulas que se emplearon para calcular los indicadores de evaluación financiera del proyecto ruta metalúrgica 1.

## Valor presente neto (VPN)

Para el cálculo del VPN se utilizaron dos tasas de descuento: la primera, equivalente al 30%, y la segunda, del 40%. Recordemos que la tasa de descuento (TD) se utiliza para trasladar los flujos netos de efectivo del futuro al presente.

Fórmula para calcular el VPN

**VPN = (-) inversión inicial (\$) +  $\frac{\text{FNE} (\$)_{\text{año 1}}}{(1 + \text{TD})^1} + \frac{\text{FNE} (\$)_{\text{año 2}}}{(1 + \text{TD})^2} \dots \frac{\text{FNE} (\$)_{\text{año 5}}}{(1 + \text{TD})^5}$**

## Tasa interna de retorno (TIR)

Fórmula para calcular la TIR

$$TIR = (-) \frac{- \text{Inversión Inicial } (\$) + \sum_{t=1}^5 \text{FNE } (\$)}{\sum_{t=1}^5 (TD(\%) \times \text{FNE } (\$))}$$

## Relación beneficio/costo (RB/C)

Antes de calcular la relación beneficio/costo se requiere estimar el valor presente neto (VPN) de los beneficios y de los costos. Para esto se utilizaron dos tasas de descuento: la primera, equivalente al 30%, y la segunda, del 40%.

Fórmulas para calcular el valor presente de los ingresos y de los costos

$$VPN \text{ Ingresos} = \frac{\text{Ingresos operacionales año 1}}{(1+TD)^1} + \frac{\text{Ingresos operacionales año 2}}{(1+TD)^2} + \dots + \frac{\text{Ingresos operacionales año 5}}{(1+TD)^5}$$

$$VPN \text{ Costos} = \frac{\text{Costos operacionales año 1}}{(1+TD)^1} + \frac{\text{Costos operacionales año 2}}{(1+TD)^2} + \dots + \frac{\text{Costos operacionales año 5}}{(1+TD)^5}$$

Después de estimar el valor presente neto (VPN) de los ingresos y de los costos se procede a calcular la relación beneficio/costo (RB/C) a partir de la aplicación de la siguiente fórmula:

Fórmula para calcular la relación beneficio/costo (RB/C)

$$\text{Relación beneficio/costo} = \frac{\sum_{t=1}^5 (VPN, \text{Ingresos } \$)}{\sum_{t=1}^5 (VPN, \text{Costos } \$)}$$

Debe tenerse en cuenta que para el cálculo de la RB/C, en los costos operacionales no se tiene en cuenta la depreciación de los bienes físicos y la maquinaria.

# 9.3. ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 1

En esta sección se presentan los resultados del ejercicio financiero, el monto de recursos económicos que se requieren para la inversión inicial, los costos totales y el valor de la producción en función de los parámetros de operación definidos para la mina y la planta, y los indicadores que comprueban la viabilidad financiera del proyecto, acorde con las condiciones iniciales típicas en la zona.

Figura 9.17. Inversión inicial. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COSTO COP (\$)*	% PARTICIPACIÓN SOBRE COSTOS TOTALES
<b>Activos fijos</b>		
Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de extracción	142.724.021	10%
Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de beneficio	1.165.186.597	80%
Instalaciones eléctricas e hidráulicas	150.823.999	10%
<b>Total activos fijos</b>	<b>1.458.734.617</b>	

\* Los precios cotizados se encuentran detallados en el informe técnico.

Figura 9.18. Costos de la fase de extracción. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP \$	COP \$/t *
Mano de obra	14.290.352	68.704
Partes y accesorios	4.055.470	19.497
Herramientas y suministros	3.631.910	17.461
Combustible y explosivos	20.317.388	97.680
Elementos de seguridad industrial	3.998.455	19.223
Mantenimiento	1.070.430	5.146
Energía eléctrica	1.255.850	6.038
Depreciación maquinaria y equipo	1.189.367	5.718
<b>Total</b>	<b>49.809.222</b>	<b>239.467</b>

\* El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 233.749/t.

Figura 9.19. Estructura de los costos de la fase de extracción de oro, operación futura en mina. Fuente: autores.

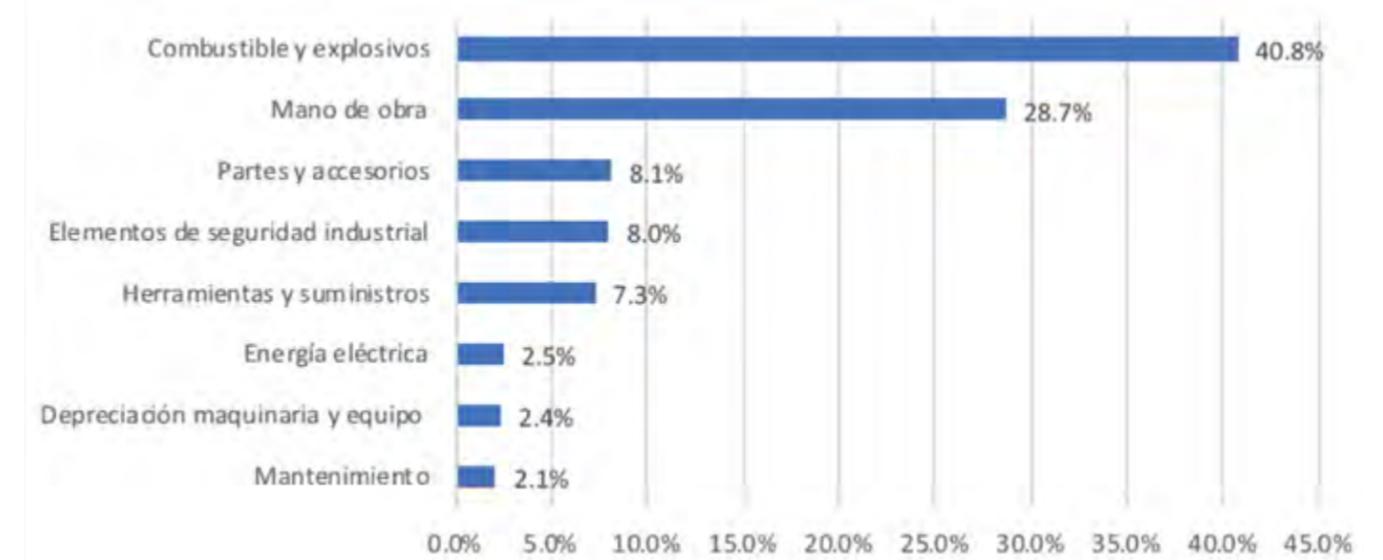


Figura 9.20. Costos de operación total (extracción + beneficio) por mes. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
Materia prima, costo de extracción	48.619.855
Insumos	8.672.406
Mano de obra	7.145.195
Mantenimiento	3.495.560
Análisis y pruebas de laboratorio	22.300.000
Servicios públicos	18.109.437
Depreciación	10.899.255
<b>Total costos directos</b>	<b>119.241.707</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	11.924.171
<b>Total costos directos + indirectos</b>	<b>131.165.878</b>

Figura 9.21. Estructura de los costos de la fase de beneficio, operación futura en planta. Fuente: autores.

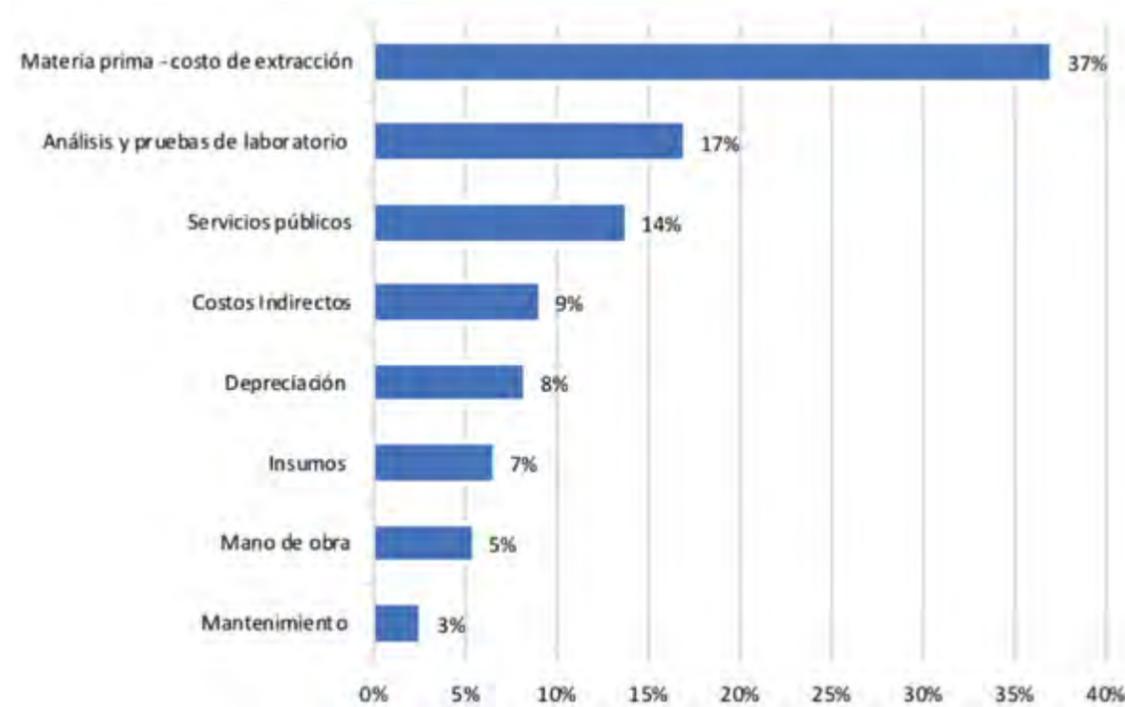


Figura 9.22. Ingresos de operación futura, por mes. Fuente: autores.

TENOR (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
10,9	75	8,18	1700	119.815	203.733.426

\* Corresponde al precio promedio internacional del oro en 2018. Fuente: cálculo propio con base en información del equipo técnico y el Banco de la República.

Figura 9.23. Flujo de caja del proyecto en horizonte de evaluación (cinco años). Fuente: autores.

CONCEPTO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(1) INVERSIÓN INICIAL (-)	-1,458,734,617					
<b>TOTAL INVERSIÓN INICIAL</b>	<b>-1,458,734,617</b>					
(2) INGRESOS GRAVABLES (+)						
Ingresos Operacionales		2,444,801,112	2,518,145,145	2,593,689,500	2,671,500,185	2,751,645,190
<b>TOTAL INGRESOS GRAVABLES</b>		<b>2,444,801,112</b>	<b>2,518,145,145</b>	<b>2,593,689,500</b>	<b>2,671,500,185</b>	<b>2,751,645,190</b>
(3) EGRESOS DEDUCIBLES (-)						
Costos Operacionales		1,443,199,469	1,468,515,109	1,494,605,050	1,521,493,572	1,549,205,735
Regalías (4%)		78,233,636	80,580,645	82,998,064	85,488,006	88,052,646
Depreciación		130,791,062	130,791,062	130,791,062	130,791,062	130,791,062
<b>TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES</b>		<b>1,652,224,166</b>	<b>1,679,886,815</b>	<b>1,708,394,176</b>	<b>1,737,772,640</b>	<b>1,768,049,442</b>
(4) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	792,576,946	838,258,330	885,295,324	933,727,545	983,595,748	
(5) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL	32.4%	33.3%	34.1%	35.0%	35.7%	
(6) IMPUESTOS (-)						
IMPUESTO DE RENTA (33%) (-)		261,550,392	276,625,249	292,147,457	308,130,090	324,586,597
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>		<b>261,550,392</b>	<b>276,625,249</b>	<b>292,147,457</b>	<b>308,130,090</b>	<b>324,586,597</b>
(7) UTILIDAD NETA		531,026,554	561,633,081	593,147,867	625,597,455	659,009,151
(8) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA		21.7%	22.3%	22.9%	23.4%	23.9%
(9) DEPRECIACIÓN (+)		130,791,062	130,791,062	130,791,062	130,791,062	130,791,062
<b>(10) FLUJO NETO DE EFECTIVO</b>	<b>-1,458,734,617</b>	<b>661,817,616</b>	<b>692,424,143</b>	<b>723,938,929</b>	<b>756,388,517</b>	<b>789,800,213</b>

### 9.3.1. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES DE EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 1

El VPN del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador correspondiente a la ruta metalúrgica 1, a una tasa de descuento del 20%, es de COP 674.749.990.

El VPN del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador correspondiente a la ruta metalúrgica 1, a una tasa de descuento del 30% COP 267.135.574.

Teniendo en cuenta que el VPN es mayor que cero (para ambas tasas de descuento), se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista financiero, pues los dineros invertidos en el proyecto rinden más que estas tasas de interés de oportunidad.

La TIR anual obtenida es mayor que las dos tasas de interés de oportunidad del inversionista, definidas en este proyecto como el 20 y 30% anuales. Se concluye que este proyecto se justifica desde el punto de vista financiero, en la medida en que los dineros que permanecen invertidos en el proyecto rinden a una tasa superior al costo de oportunidad definido.

Para este proyecto, la relación beneficio/costo a tasas de interés de oportunidad del 20 y 30% es de 1,73, en ambos casos. De este resultado se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista financiero, pues los beneficios son mayores que los costos.

Figura 9.24. Indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona, ruta metalúrgica 1. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	TASA DE DESCUENTO 20 %	TASA DE DESCUENTO 30 %
Valor presente neto (VPN)	\$674.749.990	\$267.135.574
Tasa interna de retorno (TIR)	39 %	39%
Relación beneficio/costo (RB/C)	1,73	1,73

## 9.4. ESTUDIO FINANCIERO DE LA OPERACIÓN ACTUAL VS. LA OPERACIÓN FUTURA EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 1

En esta sección se exponen los resultados del estudio financiero de la operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador, a partir de los cuales se estableció una base de comparación (en términos de porcentaje de recuperación, cantidad de oro recuperado, costo unitario de producción, margen de utilidad operacional y de utilidad neta), para analizar la viabilidad económica de la implementación de la ruta metalúrgica 1.

### Variables de operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador

Figura 9.25. Variables de operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera. Fuente: autores.

VARIABLE	VALOR
Tiempo de trabajo en mina	8 h/día
Volumen de material de mina extraído	6,30 t/día
Volumen de material estéril extraído	4,3 t/día
Volumen de material mineral extraído	2 t/día
Capacidad de procesamiento	0,25 t/h
Funcionamiento de la planta	8 h/día
Volumen de procesamiento	2 t/día
Turnos por día	1 por día
Días de operación al mes	26 días
Volumen de procesamiento	52 t/mes
Tenor por tonelada de material de mina	7,9 g/t
Porcentaje total de recuperación de oro	60 %
Recuperación total de oro	4,74 g/t

Debe tenerse en cuenta que las variables de la operación actual de la mina y planta de beneficio típica de la zona se definieron a partir de la información recolectada en trabajo de campo por el equipo técnico.

## 9.4.1. RESULTADOS DE LA OPERACIÓN ACTUAL DEL BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR

Figura 9.26. Costos actuales de la fase de extracción, por mes. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP \$	COP \$/t *
Mantenimiento	194.701	3.744
Depreciación maquinaria y equipo	216.334	4.160
Energía eléctrica	662.426	12.739
Partes y accesorios	1.303.545	25.068
Elementos de seguridad industrial	1.642.233	31.581
Combustible y explosivos	2.144.404	41.239
Herramientas y suministros	2.649.055	50.943
Mano de obra	11.432.282	219.852
<b>Total</b>	<b>20.244.980</b>	<b>389.327</b>

\* El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 385.166/t.

Figura 9.27. Estructura de costos actuales de la fase de extracción de oro. Fuente: autores.

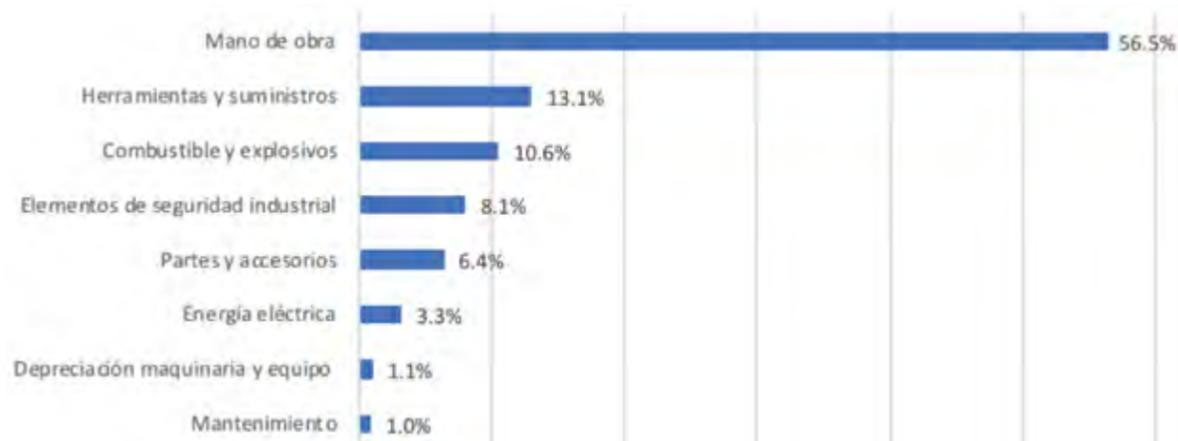


Figura 9.28. Costos de la operación actual (extracción + beneficio), por mes. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
Materia prima	20.028.646
Insumos	588.989
Mano de obra	2.858.070
Mantenimiento	262.500
Servicios públicos	1.118.624
Depreciación de maquinaria y equipo	508.001
<b>Total costos directos</b>	<b>25.364.831</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	2.536.483
<b>Total costos directos + indirectos</b>	<b>27.901.314</b>

Figura 9.29. Estructura de los costos actuales de la fase de beneficio. Fuente: autores.

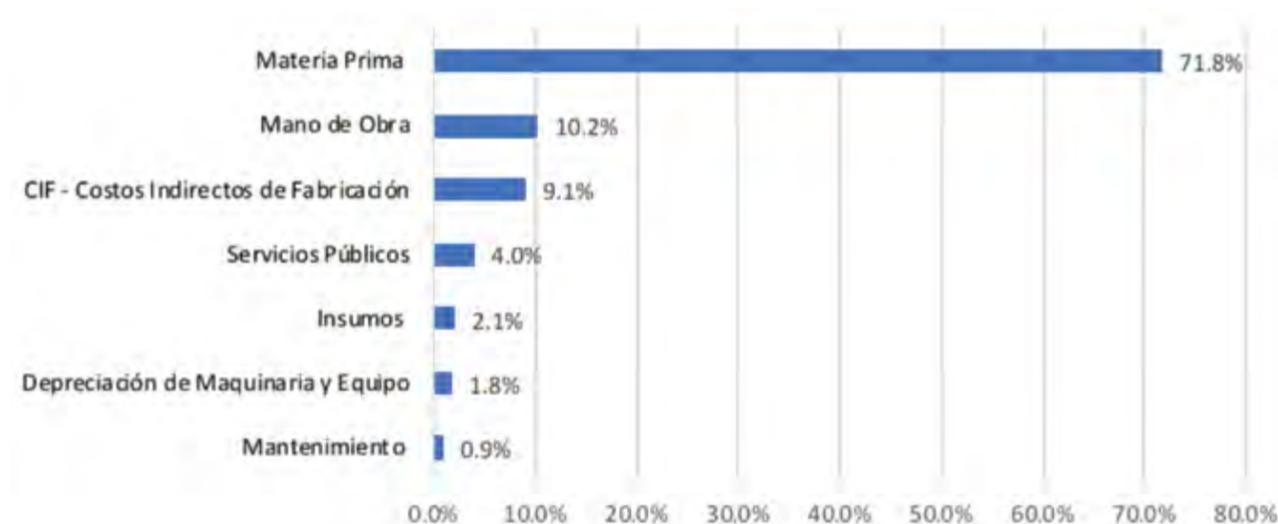


Figura 9.30. Ingresos de la operación actual, por mes. Fuente: autores.

PROCESO	TENOR (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
Concentración gravimétrica	7,9	60	4,74	246	119.815	29.532.001

\* Corresponde al precio promedio internacional del oro en 2018. Fuente: cálculo propio con base en información del equipo técnico y el Banco de la República.

Figura 9.31. Flujo de caja de la operación actual en horizonte de evaluación (cinco años). Fuente: autores.

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(1) INGRESOS GRAVABLES (+)					
Ingresos Operacionales	354,384,014	365,015,535	375,966,001	387,244,981	398,862,330
<b>TOTAL INGRESOS GRAVABLES</b>	<b>354,384,014</b>	<b>365,015,535</b>	<b>375,966,001</b>	<b>387,244,981</b>	<b>398,862,330</b>
(2) EGRESOS DEDUCIBLES (-)					
Costos Operacionales	328,719,755	338,315,653	348,212,964	358,421,302	368,950,594
Depreciación	6,096,008	6,096,008	6,096,008	6,096,008	6,096,008
Regalías	11,340,288	11,680,497	12,030,912	12,391,839	12,763,595
<b>TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES</b>	<b>346,156,051</b>	<b>356,092,158</b>	<b>366,339,883</b>	<b>376,909,149</b>	<b>387,810,197</b>
(3) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	8,227,963	8,923,377	9,626,117	10,335,832	11,052,134
(4) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL	2.32%	2.44%	2.56%	2.67%	2.77%
(5) IMPUESTOS (-)					
IMPUESTO DE RENTA (33%) (-)	2,715,228	2,944,714	3,176,619	3,410,825	3,647,204
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>	<b>2,715,228</b>	<b>2,944,714</b>	<b>3,176,619</b>	<b>3,410,825</b>	<b>3,647,204</b>
(6) UTILIDAD NETA	5,512,735	5,978,663	6,449,499	6,925,007	7,404,930
(7) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA	1.56%	1.64%	1.72%	1.79%	1.86%
(8) DEPRECIACIÓN (+)	6,096,008	6,096,008	6,096,008	6,096,008	6,096,008
<b>(9) FLUJO NETO DE EFECTIVO</b>	<b>11,608,743</b>	<b>12,074,670</b>	<b>12,545,507</b>	<b>13,021,015</b>	<b>13,500,937</b>

Los supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de ingresos y costos de operación actual son los mismos que se definieron para la operación futura de la mina y planta de beneficio típicas de la zona.

## 9.4.2. RESUMEN DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS. OPERACIÓN FUTURA, RUTA METALÚRGICA 1

Figura 9.32. Resumen de indicadores de operación actual vs. operación futura, ruta metalúrgica 1. Fuente: autores.

INDICADOR	OPERACIÓN ACTUAL	OPERACIÓN FUTURA
Recuperación de oro (gr/t)	60 %	75 %
Cantidad de oro recuperado por tonelada	4,74 gr	8,18 gr
Costo de producción unitario por gramo de oro	COP 113.199	COP 77.138
Costo de producción unitario por onza troy de oro	USD 1.174	USD 800
Utilidad antes de impuestos por gramo de oro	COP 2.782	COP 38.843
Utilidad antes de impuestos por onza troy de oro	USD 28,8	USD 403
Margen de utilidad operacional (promedio 5 años)	2,6%	34,1%
Utilidad después de impuestos por gramo de oro	COP 1.864	COP 26.025
Utilidad después de impuestos por onza troy de oro	USD 19,3	USD 270
Margen de utilidad neta (promedio 5 años)	1,7%	22,9%
Indicador de productividad (producto/insumo)	1,06	1,55

Precio de venta por gramo de oro: COP 119.815. Precio de venta por onza de troy de oro: USD 1242. Tasa de cambio utilizada: COP 3000/USD. Factor de conversión utilizado: 1 onza troy = 31,1034768 gramos

## 9.4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS. OPERACIÓN FUTURA DE LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 1

La adopción integral de la ruta metalúrgica 1 como una alternativa para mejorar los niveles de eficiencia en el proceso de beneficio de oro permite a la empresa minera incrementar la productividad total en aproximadamente 46,2%, al pasar de una razón producto/insumo total de 1,06, bajo las condiciones de la producción actual de la mina y la planta de beneficio típicas de la zona, a una razón de productividad de 1,55 con la implementación de la ruta metalúrgica propuesta.

Esto corrobora la generación de beneficios económicos a la empresa minera y se espera que presente, desde el punto de vista financiero, un incentivo para que el empresario adopte la presente propuesta y desarrolle su operación bajo el estricto cumplimiento de los estándares técnico-administrativos y legales.

Cabe resaltar que se estableció que en el escenario de producción actual el costo unitario de producir un gramo de oro es de aproximadamente COP 113.199, mientras que se espera que, con la operación futura, el costo unitario del gramo de oro sea de COP 77.138. Este resultado indica una reducción efectiva de los costos unitarios de 46,7%.

Esta reducción en costos unitarios de producción con la implementación de la ruta metalúrgica 1, junto con el aumento en el porcentaje del gramo de oro recuperado por cada tonelada de mineral procesado (de 60% a

75%) resulta en un aumento del margen de utilidad neta proyectada para los cinco años evaluados, al pasar de 1,7% en la actualidad, a 22,9%, en la operación futura.

Como anexo a la presente guía encontrará un simulador en formato Excel, en el que podrá introducir las variables de operación deseadas (según las características propias de la mina y de la planta de beneficio) y efectuar un ejercicio de planeación financiera para estimar los costos unitarios de operación, los márgenes de utilidad operacional y determinar los rendimientos futuros de la inversión necesaria para la implementación de la ruta metalúrgica 1.

**En el escenario actual de la operación de la mina y la planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador, el costo unitario de producir 1 g de oro es de COP 113.199, mientras que la implementación de la ruta metalúrgica 1 reduce este costo a COP 77.138.**

**Esta disminución en costo de producción, junto con el aumento de los ingresos por un porcentaje de mayor recuperación de oro, se traduce en un incremento de la utilidad neta de 1.298%.**

## 9.5. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR

- En el estudio financiero de la operación actual de la planta se utilizó como referencia un porcentaje de recuperación de oro de 60% por cada tonelada de mineral procesado, obtenido en el proceso de concentración gravimétrica, de acuerdo con la información colectada en campo por el equipo técnico.
- Teniendo en cuenta que el tenor de la zona minera de Puerto Libertador es de 7,9 gramos por tonelada, y que la operación actual permite una recuperación promedio del 60%, en el estudio financiero se estimó una recuperación de 4,74 gramos por cada tonelada de mineral beneficiada.
- El costo por materia prima, definido en este ejercicio como el costo de extracción del mineral por cada tonelada, es de COP 385.166/t, excluyendo el costo por la depreciación de bienes físicos.
- Los rubros más representativos en la estructura de costos de la fase de extracción del mineral son la mano de obra y la compra de herramientas y suministros, cada uno con una participación sobre los costos totales de 56,5 y 13,1%, respectivamente.
- Los rubros más representativos en la estructura de costos de la operación actual de la planta son la materia prima y la mano de obra, cada uno con una participación sobre los costos totales de 71,8 y 10,2%, respectivamente.
- Se estableció que la planta de beneficio tiene un consumo de agua por cada tonelada de mineral procesado de aproximadamente 0,53 m<sup>3</sup>.
- El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la mina y en la planta de beneficio, así como del número de horas al día durante las cuales se utilizarían. De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la mina y la planta de beneficio, el consumo de energía actual es de 3.024 kW/mes, lo que equivale a un costo promedio de energía eléctrica mensual de COP 1.738.800.
- El costo unitario aproximado, teniendo en cuenta los parámetros de la operación actual definidos para la planta, es de COP 113.199 por cada gramo de oro y de USD 1.174 por cada onza troy de oro.
- El precio de venta que se utilizó como referencia para el estudio financiero de la operación actual corresponde al precio del oro promedio internacional del año 2018. Este precio es de COP 119.815/g y de USD 1.242/onza troy.
- La ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) aproximada es de COP 2.782/g de oro y de USD 28,8/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 2,6%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- La ganancia unitaria (después de pagar impuestos) aproximada es de COP 1.864/g de oro y de USD 19,3/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 1,7%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.

## 9.6. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN FUTURA DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 1

- Se estableció un potencial de procesamiento anual para las plantas de beneficio de la zona, después de la implementación de la ruta metalúrgica 1, de 2.496 toneladas de mineral, lo cual implica un funcionamiento de la planta de 26 días al mes y un procesamiento de 8 toneladas de mineral al día.
- La implementación de la propuesta de adecuación tecnológica para mejorar la eficiencia del proceso de beneficio del oro permite alcanzar hasta un 75%. Este porcentaje es mayor que la recuperación promedio que se obtiene en la planta en las condiciones actuales.
- Teniendo en cuenta que el tenor de corte del material de cabeza promedio que se procesa en la planta es de mínimo 10,9 gramos, y que la implementación de la ruta metalúrgica 1 en la operación futura permite una recuperación mínima aproximada de 75%, se espera una recuperación de 8,18 gramos por cada tonelada de mineral beneficiada.
- Se definió un esquema conservador, en el cual se obtiene una recuperación de oro equivalente al 75% por cada tonelada de material mineral procesado. Sin embargo, estos rendimientos pueden ser superiores al 85%.
- A partir de las características de las minas y las plantas típicas de la zona y las variables de operaciones definidas por el equipo técnico, se realizó un inventario de la maquinaria y de los equipos nuevos que se deben adquirir para mejorar algunos de los procesos que se están desarrollando en la operación de extracción del mineral y en la planta de beneficio, con el fin de implementar los nuevos procesos que se detallan en la ruta metalúrgica 1, contenida en esta guía. El monto de recursos que deberán invertirse para la adecuación es de COP 1.458.734.617.
- La definición del inventario de maquinaria y equipo nuevos, tanto para la fase de extracción del mineral, como para la de beneficio, con sus respectivas especificaciones técnicas, se costeo en su totalidad con el fin de evaluar la rentabilidad de nuevos emprendimientos.
- Los rubros más representativos de la estructura de costos de la fase de extracción son el costo de los explosivos y combustible, y la mano de obra, cada uno con una participación sobre los costos totales de 40,8 y 28,7%, respectivamente.
- Los rubros más representativos de la estructura de costos de la operación futura de la planta son el costo de extracción y el costo de los análisis y pruebas de laboratorio, cada uno con una participación sobre los costos totales de 37 y 17%, respectivamente.
- El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la mina y en la planta de beneficio y del número de horas al día durante las cuales se utilizarían. De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos, el consumo de energía de toda la operación es de 33.384 kW/mes.
- A partir de experimentos de laboratorio efectuados por el equipo técnico se determinó la dosificación adecuada de los insumos y elementos químicos que se deben utilizar en cada uno de los procesos de la operación de beneficio.

- El material mineral que debe ir a cianuración corresponde al 8% del total de material de cabeza, es decir que, por cada 8 toneladas procesadas por día, 0,64 toneladas se cianuran.
- El costo unitario aproximado que se puede alcanzar con la implementación de la propuesta de adecuación es de COP 77.138 por cada gramo de oro, y de USD 800 por cada onza troy.
- El costo de los análisis y pruebas de laboratorio que se deben realizar para tener el control de la eficiencia de cada uno de los procesos de la operación y los impactos ambientales asociados a elementos tóxicos que se pueden generar puede racionalizarse con la inversión futura en el montaje de un laboratorio. Se prevé que este laboratorio puede tener una demanda potencial de las empresas mineras de la zona.
- El precio de venta que se utilizó como referencia para el estudio financiero de la operación futura corresponde al precio del oro promedio internacional del año 2018. Este precio es de COP 119.815/g y de USD 1242/onza troy.
- Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) de COP 38.843/g de oro y de USD 403/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 34,1%, en promedio, en los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria neta (después de pagar impuestos) de COP 26.025/g de oro y de USD 270/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 22,9%, en promedio, en los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- Se estableció que la inversión en adecuación de las plantas de beneficio de la zona minera de Puerto Libertador, a partir de la implementación de la ruta metalúrgica 1, se justifica desde el punto de vista financiero, ya que los resultados de los indicadores demuestran que los beneficios son mayores que los costos, incluyendo la inversión inicial, y que los dineros invertidos en el proyecto rinden más que las tasas de interés de oportunidad de 20 y 30% anuales.
- El período de recuperación de la inversión en adecuaciones, con las tasas de interés de oportunidad del 20 y 30% anuales, es inferior a un año.

## 9.7. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 2

En esta sección se enseña la metodología que se emplea en cada una de las etapas del estudio y evaluación financiera del proyecto, correspondiente a la ruta metalúrgica 2 (zona minera de Puerto Libertador), al mismo tiempo que se exponen las recomendaciones técnicas (provenientes de los estudios geológico, minero, metalúrgico y químico-ambiental) que soportan la definición de las variables de operación de la mina y de la planta de beneficio que representa las condiciones típicas de la zona, y se presentan los supuestos que se tuvieron en cuenta para realizar la proyección de ingresos y egresos de la operación futura, durante el horizonte de evaluación definido.

### Variables de operación futura de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2

Para la realización del estudio financiero se establecieron unas variables de operación de la mina y de la planta de beneficio típicas de la zona, que fueron determinadas por el equipo técnico a partir de la información recolectada en campo y los resultados de los estudios técnicos efectuados.

#### 9.7.1. ESTUDIO FINANCIERO

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente las inversiones en activos fijos y diferidos que se requieren para la puesta en marcha de la ruta metalúrgica 2, como se explica enseguida.

##### 9.7.1.1. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

###### Activos fijos

La inversión en activos fijos está representada en la adquisición de maquinaria y equipo, tanto para las operaciones de extracción del material de mina como para las operaciones unitarias del proceso de beneficio (incluido el costo de instalaciones eléctricas e hidráulicas para su funcionamiento) y el costo del montaje del laboratorio.

Figura 9.33. Variables de operación futura de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

VARIABLE	VALOR
Tiempo de trabajo en mina	8 h/día
Volumen de material de mina extraído	10 t/día
Volumen de material estéril extraído	8 t/día
Volumen de material mineral extraído	2 t/día
Capacidad de procesamiento de la planta	1 t/h
Tiempo de funcionamiento de la planta	8 h/día
Volumen de procesamiento	8 t/día
Turnos por día	1 por día
Días de operación al mes	26 días
Volumen de procesamiento	208 t/mes
Tenor por tonelada de material de mina	7,7 g/t
Porcentaje total de recuperación de oro	70 %
Recuperación total de oro	5,39 g/t

La puesta en marcha de la propuesta de modernización, ruta metalúrgica 2, requiere la compra total de la maquinaria que se relaciona enseguida. Estas especificaciones técnicas corresponden al volumen de material mineral que se debe extraer por día y a la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio definida por el equipo técnico.

- **Maquinaria y equipo**

Este rubro comprende el costo de la maquinaria y los equipos que se deben adquirir para mejorar algunos de los procesos que se están desarrollando en la operación de extracción del mineral y en la planta de beneficio, con el fin de implementar los nuevos procesos que se detallan en la ruta metalúrgica 2, contenida en esta guía.

Figura 9.34. Maquinaria y los equipos nuevos que se requieren para mejorar las operaciones en la fase de extracción del mineral. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN DE MAQUINARIA Y EQUIPO	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
Perforadora neumática	26 kg	2
Picador neumático	8,5 kg	2
Rotomartillo eléctrico	599 x 134 x 287 mm	2
Ventiladores axial	90 m <sup>3</sup> /minuto	2
Extractor ventilador axial	45 m <sup>3</sup> /minuto	1
Compresor portátil diésel	Unidad compresora 5 años (10.000 horas)	1
Planta eléctrica diésel doméstica	5,5 kW	1
Bomba autocebante	1,5 hp	2
Bomba sumergible	1,5 hp	1
Malacate con motor	motor 3 hp	2

Figura 9.35. Maquinaria equipos nuevos para la implementación de la ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

PROCESOS	MÁQUINA Y DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Tolva para almacenar material de mina	4 x 4 x 2 m	1
	Trituradora de quijadas	10" x 16"	1
	Criba vibratoria	1,5 x 0,9 m	1
	Trituradora de martillos	24" x 10"	1
	Banda transportadora con estructura de soporte (20 metros)	18"	1
	Tolva para material triturado	4 x 4 x 2 m	1
	Molino de bolas primario	4" x 5" - 1,20 x 1,50	1
	Caja de pulpa	0,80 x 0,80 x 1 m	2
	Bomba de sólidos	2,5" x 2"	2
	Hidrociclón 1	4"	1
CONCENTRACIÓN	Concentrador centrífugo	2t/h	2
	Mesa gemini de refinación	40kg/h	1
	Tanque espesador	2,5 m	1
FUNDICIÓN	Horno con crisol	Capacidad de 15 kg	1
MANEJO AMBIENTAL	Bomba de sólidos	2,5" x 2"	1
	Hidrociclón desaguador	6"	1
	Tanques auxiliares en propileno*	1000 L	1

Para la definición de la maquinaria y los equipos que deben comprarse se partió del inventario inicial de las minas y plantas de la zona, con el objetivo de no incurrir en costos innecesarios y así optimizar los recursos disponibles.

En la siguiente tabla se detallan la maquinaria y los equipos nuevos que se requieren para mejorar las operaciones en la fase de extracción del mineral, de acuerdo con las condiciones y el inventario actual de las minas de la zona. De igual manera, en la figura 9.35. se relacionan la maquinaria y los equipos nuevos que deberán ser adquiridos para la implementación de la ruta metalúrgica 2.

- **Instalaciones eléctricas e hidráulicas**

Este rubro comprende el costo de materiales y el pago de honorarios del personal calificado que llevará a cabo las adecuaciones eléctricas e hidráulicas necesarias para la instalación y puesta en funcionamiento de la maquinaria y los equipos nuevos.

- **Montaje de laboratorio**

Este rubro comprende el costo del montaje del laboratorio requerido para obtener información oportuna y veraz acerca de la eficiencia de las operaciones implicadas en el proceso y de los impactos ambientales de tipo químico que se estén causando con el proceso de beneficio.

### Activos diferidos

La adquisición del siguiente activo diferido está sujeta a las condiciones propias de cada unidad de explotación.

- **Licencia ambiental**

Este rubro comprende el costo de los estudios previos que se deben realizar para tramitar la so-

Figura 9.36. Insumos que se utilizan en las operaciones de extracción del material de mina. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
<b>PARTES Y ACCESORIOS</b>	
Acople 3/4 espigo	2 unidades
Acople 3/4 macho	2 unidades
Acople 3/4 macho	2 unidades
Abrazadera 3/4	2 unidades
Barra de avance	1 unidad
Broca helicoidal SDS Max Diager 32 x 690	3 unidades
Broca helicoidal SDS Max Diager 1.174 x 36 (32 x 920 mm)	3 unidades
Barrena integral Sandvik de 3" (0,80 cm)	2 unidad
Barrena integral Sandvik de 3" (1,20 cm)	2 unidad
<b>HERRAMIENTAS Y SUMINISTROS</b>	
Carretas	1 unidad
Palas	4 unidades
Picas	4 unidades
Manguera de 1" para aire comprimido	44 metros
Manguera de 1" para agua	44 unidades
Tablón de madera x 2 mts	30 tablonos
Palancas de madera	26 unidades
Cable encauchetado 2" x 12"	44 metros
Toma eléctrica	2 unidades
Clavos de acero de 3"	1 caja x 25
Tubo de PVC	24 metros
Clavija	2 unidades
Bombillos de litio	8 unidades
Aceite Mobil Almo 527	2 unidades
Ducto plástico para ventilador (mangas)	2 unidades
<b>COMBUSTIBLE Y EXPLOSIVOS</b>	
Combustible diésel	208 galones
Indugel Plus AP (26 x 250 mm) caja x 25 kg*	203 kg
Anfo Rezar, bulto de 25 kg*	125 kg
Detonador común n.º 8 (caja de 100 unidades)*	1.248 unidades
Mecha lenta de seguridad (caja por 500 metros)*	3.120 metros

\*En este rubro se tiene en cuenta el costo adicional mensual que representa el pago del traslado de los explosivos con escolta, desde el punto de venta hasta la mina.

**El monto de las inversiones que se requieren para mejorar las operaciones en la fase de extracción del mineral y la adecuación de la planta de beneficio (maquinaria y equipo, instalaciones eléctricas e hidráulicas y montaje de laboratorio) dependerá de las características de cada mina y de cada planta, así como de la negociación del minero con su proveedor.**

**Para el desarrollo de la explotación minera y el beneficio de oro se debe contar con dos criterios básicos: 1) trabajar bajo el amparo de un título minero, y 2) contar con un instrumento ambiental.**

licitud de la licencia ambiental y el valor que se debe pagar a la autoridad ambiental competente, una vez sea aprobada la licencia.

### 9.7.1.2. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE COSTOS DE LA FASE DE EXTRACCIÓN

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente cada uno de los costos directos de la fase de extracción del material de mina.

#### Costos directos de la fase de extracción

Los costos directos de la fase de extracción del mineral tienen que ver con la adquisición de insumos (partes, accesorios, herramientas, suministros, combustible y explosivos), compra de elementos de seguridad industrial, la contratación de mano de obra, el mantenimiento de maquinaria y equipos, el pago de energía eléctrica y la depreciación de bienes físicos.

- **Insumos para la fase de extracción**

Respecto al rubro de insumos, se tiene en cuenta el costo mensual de la adquisición de partes y accesorios de la maquinaria y los equipos, las herramientas y los suministros para la extracción, y el combustible y los explosivos utilizados.

En la figura 9.36 se muestra el detalle de los insumos que se utilizan en las operaciones de extracción del material de mina, de acuerdo con los metros de avance en la exploración definidos previamente por el equipo técnico (26 metros de avance mensual, según variables de operación de la mina y de la planta típicas de la zona).

- **Mano de obra para la fase de extracción**

En este rubro se cuantifica el pago mensual de los salarios del personal vinculado a la operación de extracción del mineral, los aportes a seguridad social que deben ser asumidos por el empleador con base en la Ley 100 de 1993 (salud, pensión y ARL), los aportes parafiscales que deben destinarse al ICBF, al SENA y a las cajas de compensación familiar, así como la respectiva provisión mensual para el pago de las prestaciones sociales (prima, vacaciones, cesantías e intereses de cesantías).

### Salarios de los empleados

El costo de mano de obra se calcula para un total de diez empleados, conforme a la distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, que se muestran en la siguiente tabla:

Figura 9.37. Distribución de operarios por proceso y asignación salarial. Fuente: autores.

PROCESO	CARGO	CANTIDAD DE OPERARIOS	TURNOS X DÍA	SUELDO BÁSICO X MES (COP)	AUX. TRANSPORTE X MES (COP)	SALARIO TOTAL X MES (COP)*
Frente de explotación	Operario	4	1	828.116	97.032	3.700.592
Carga y transporte	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Preparación	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Desarrollo	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
General	Supervisor	1	1	828.116	97.032	925.148
<b>Total</b>		<b>10</b>				<b>9.251.480</b>

\* El salario total asignado a los operarios y el supervisor corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019.

- **Aportes al Sistema General de Seguridad Social**

El cálculo de aportes a cargo del empleador, con destino al Sistema General de Seguridad Social (SGSS) se realizó con base en los sueldos básicos por mes que se indicaron en la tabla anterior.

Fórmula para calcular los aportes a seguridad social

$$\text{Aportes a seguridad social (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aportes (EPS, pensión, ARL)}$$

- **Aportes parafiscales**

El cálculo de aportes parafiscales que corresponden a una contribución obligatoria del empleador con destino al Servicio Nacional de Aprendizaje, al Instituto Colombiano de Bienestar Familiar y a las cajas de compensación familiar, con el propósito de que dicho aporte permita a estas entidades ejecutar las labores para las cuales fueron creadas, se estimó conforme a los salarios básicos asignados a los empleados.

Fórmula para calcular los aportes a parafiscales

$$\text{Aportes parafiscales (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aporte (SENA, ICBF, CCF)}$$

- **Prestaciones sociales**

El cálculo de la provisión mensual sobre el valor de la nómina, para el pago de prestaciones sociales a los trabajadores, se estimó con base en el salario mensual total asignado a cada operario.

Fórmula para calcular la provisión para pago de prestaciones sociales

$$\text{Provisión (\$/mes)} = \text{salario total (\$)} \times \% \text{ de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)}$$

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

$$\text{Provisión pago de intereses de cesantías (\$/mes)} = \text{cesantías (\$)} \times 12\%$$

- **Elementos de protección personal para la fase de extracción**

Este rubro comprende el costo de la adquisición de los elementos que conforman el equipo de protección personal de los operarios de la mina.

Para el cálculo de este costo se consideró la frecuencia de compra de los elementos y las respectivas cantidades para establecer un factor de conversión que permitiera convertir el costo total en un costo mensual, esto teniendo en cuenta que dichos elementos tienen frecuencia de compra diferente.

La figura 9.39. contiene el detalle de los elementos de protección personal que se requieren para garantizar la seguridad de los trabajadores de la mina.

**El cálculo de los aportes al SGSS y contribuciones parafiscales se debe realizar sobre la base del sueldo básico, es decir, sin tener en cuenta el auxilio de transporte, en tanto que la liquidación de las prestaciones sociales se debe tomar como base del cálculo del salario total, esto es, el sueldo básico más el auxilio de transporte.**

- **Mantenimiento de los bienes físicos para la fase de extracción**

En este rubro se cuantifican todos los gastos necesarios para conservar la maquinaria y los equipos en buenas condiciones, a efectos de que trabajen con rendimiento normal durante su vida útil y prolonguen sustancialmente su tiempo de uso.

El costo del mantenimiento de la maquinaria y de los equipos se estableció como un porcentaje equivalente a 0,75% del valor comercial de la maquinaria (este valor incluye el costo del mantenimiento preventivo y correctivo y la compra de repuestos).

Fórmula para calcular el costo de mantenimiento

$$\text{Costo de mantenimiento (\$)} = \text{valor comercial total (\$)} \times 0,75\%$$

- **Costo de energía eléctrica para la fase de extracción**

En este rubro se cuantifica el costo de la energía eléctrica mensual que se consume en el proceso de extracción del mineral.

Figura 9.38. Tablas de aportes a SGSS, parafiscales y prestaciones sociales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTE SGSS COP (\\$)	DESCRIPCIÓN
EPS (salud)	\$ 70.390	Aporte total (12,5 %): \$ 103.515 Aporte del empleador (8,5 %): \$ 70.390 Aporte del trabajador (4 %): \$ 33.125
Pensión (AFP)	\$ 99.374	Aporte total (16 %): \$ 132.499 Aporte empleador (12 %): \$ 99.374 Aporte trabajador (4 %): \$ 33.125
ARL	\$ 57.637	Aporte total Riesgo V (6,96 %): \$ 57.637 Aporte empleador: \$ 57.637
<b>Total:</b>	<b>\$ 227.401</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en la Ley 100 de 1993.

CONCEPTO	APORTES PARAFISCALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Caja de compensación familiar	\$ 33.125	Aporte total al CCF: (4 %) a cargo del empleador
ICBF	\$ 24.843	Aporte total al ICBF: (3 %) a cargo del empleador
SENA	\$ 16.562	Aporte total al SENA -: (2 %) a cargo del empleador
<b>Total:</b>	<b>\$ 74.530</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en los porcentajes establecidos en el Código Sustantivo del Trabajo.

CONCEPTO	PRESTACIONES SOCIALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Cesantías (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Intereses de cesantías (12%)	\$ 9.251	(12 %): corresponde al 12 % sobre el valor a pagar de las cesantías
Prima de servicios (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Vacaciones (4,17%)	\$ 38.579	(4,17 %): la ley del trabajo establece 15 días hábiles consecutivos de vacaciones anuales remuneradas
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 201.960</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en Ley 1607 de 2012.

Figura 9.39. Elementos de protección personal en la mina. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA DE COMPRA	CANTIDAD*
Arnés en X Expert Line	Quinquenal	10 unidades
Línea de vida de 16 mm, 50 metros	Quinquenal	10 unidades
Cargador individual CH	Anual	15 unidades
Lámpara KL5LM naranja 8,000 lux	Anual	15 unidades
Cargador para lámpara	Anual	4 unidades
Lámpara KL4MS	Anual	4 unidades
Casco con portalámpara	Anual	15 unidades
Overol tipo piloto con cinta	Cuatrimstral	30 unidades
Cinturón minero de nylon con anillo	Cuatrimstral	10 unidades
Bota de seguridad exportadora	Cuatrimstral	15 unidades
Bota conga II	Cuatrimstral	15 unidades
Fono Samuray (protector auditivo externo)	Cuatrimstral	15 unidades
Conjunto de dos 2 piezas de ajuste en broche (impermeable)	Cuatrimstral	15 unidades
Respirador media cara 7500	Cuatrimstral	15 unidades
Guante de nylon en de nitrilo	Mensual	20 unidades
Filtros para partículas 7993B A/E 110167-5	Mensual	20 unidades
Lente Nitro II AF 110005-0	Mensual	15 unidades
Protector reusable Libus - Reflex bolsa (protector auditivo de inserción)	Mensual	20 unidades

\* Las cantidades se determinaron para un total de 10 empleados.

El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados para la extracción del mineral y el número de horas al día durante las cuales se utilizarían, de acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos.

El costo total por energía eléctrica mensual se calcula con base en el consumo en kWh/mes, y la tarifa por kW que se paga a la empresa que suministra el servicio.

Fórmula para calcular el costo mensual de energía eléctrica  
**Costo de la energía eléctrica (\$) = consumo energía (kWh/mes) × tarifa kW (\$)**

Figura 9.40. Consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo en la fase de extracción. Fuente: autores.

EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA DE MOTOR hp	POTENCIA Kw	POTENCIA EFECTIVA Kw	HORAS TRABAJO	Kw/DÍA	Kw/MES
Rotomartillo eléctrico	2	2	1,5	1,20	8	19,2	499,2
Ventiladores axial	2	2	1,5	1,20	8	19,2	499,2
Bomba sumergible	1	1,5	1,125	0,90	8	7,2	187,2
Extractor ventilador axial	1	2	1,5	1,20	8	9,6	249,6
Motor malacate	2	3	2,25	1,80	8	28,8	748,8
<b>Total:</b>						<b>84</b>	<b>2.184</b>

• **Depreciación de maquinaria y equipo durante la fase de extracción**

En este rubro se valora la reducción del valor de la maquinaria como consecuencia de su uso. Debe tenerse en cuenta que, pese a que la depreciación no representa una salida de efectivo, este mecanismo debe considerarse a efectos de recuperar la inversión en activos fijos.

**El método de línea recta está reconocido por la DIAN para descontar el valor de la depreciación de la base de cálculo del impuesto de renta y complementarios.**

El valor de depreciación mensual de cada equipo se estimó por medio del método en línea recta, utilizando como referencia un tiempo de vida útil de diez años.

Fórmula para calcular la depreciación de la maquinaria y el equipo  
**Costo de depreciación (\$) = valor comercial del equipo (\$)/tiempo de vida útil (meses)**

**9.7.1.3. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE COSTOS DE LA FASE DE BENEFICIO**

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente cada uno de los costos (directos e indirectos) de la operación de la planta de beneficio, conforme a la ruta metalúrgica propuesta.

De acuerdo con el diagrama de operaciones de la ruta metalúrgica 2 (figura 8.26.), los costos de operación se cuantificaron y clasificaron para cada uno de los siguientes procesos:

- Trituración y molienda
- Concentración (gravimétrica y por flotación)
- Fundición
- Manejo ambiental

**Costos directos de la fase de beneficio**

Los costos directos del proceso de beneficio tienen que ver con la adquisición de materia prima e insumos, la contratación de mano de obra, el mantenimiento de maquinaria y equipos, el análisis y pruebas de laboratorio, el pago de servicios públicos (energía eléctrica y agua) y la depreciación de bienes físicos.

• **Materia prima para la fase de beneficio/costo de extracción**

El costo de materia prima corresponde al valor que se debe pagar por cada tonelada de material mineral puesto en tolva. En este ejercicio, el costo de la materia prima se define como el costo de extracción del mineral, que incluye los rubros mencionados en la sección 9.7.1.2, "Identificación y valoración de costos de la fase de extracción".

Debe tenerse en cuenta que en la estimación de los costos totales de la fase de beneficio, al costo de extracción por cada tonelada de material procesado se descuenta el valor de la depreciación de los bienes físicos y maquinaria utilizados en esta fase, a efectos de facilitar la sistematización de la información en el flujo de caja del proyecto.

• **Insumos para la fase de beneficio**

Respecto al rubro de insumos, se tiene en cuenta el costo de los reactivos y elementos químicos que se emplean en cada proceso, según se detalla en la figura 9.41.

Figura 9.41. Insumos para la fase de beneficio. Fuente: autores.

PROCESOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CONSUMO / TONELADA*	CONSUMO MENSUAL**
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Cuerpos molidores	1,2	312 kg	
	Revestimientos trituradora primaria	1,2	312 kg	
	Revestimientos trituradora secundaria	1,2	312 kg	
	Revestimientos molino primario	1,2	312 kg	
	Revestimientos molino secundario	1,2	312 kg	
FUNDICIÓN	Bórax	0,044	11 kg	
MANEJO AMBIENTAL	Carbonato de sodio	0,008	2 kg	
	Sílice	0,025	7 kg	
	Floculante	0,004	1 kg	

\* La dosificación por tonelada fue determinada por el equipo técnico. \*\* La cantidad consumida por mes se estimó para 208 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta.

## Mano de obra para la fase de beneficio

En este rubro se cuantifica el pago mensual de los salarios del personal vinculado a la operación de beneficio, los aportes a seguridad social que deben ser asumidos por el empleador con base en la Ley 100 de 1993 (salud, pensión y ARL), los aportes parafiscales que deben destinarse al ICBF, al SENA y a las cajas de compensación familiar, así como la respectiva provisión mensual para el pago de las prestaciones sociales (prima, vacaciones, cesantías e intereses de cesantías).

### • Salarios de los empleados

El costo de mano de obra se calcula para un total de siete empleados, conforme a la distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, que se muestran en la siguiente tabla:

Figura 9.42. distribución de operarios por proceso y la asignación salarial. Fuente: autores.

PROCESO	CARGO	CANTIDAD DE OPERARIOS	TURNOS X DÍA	SUELDO BÁSICO X MES (COP)	AUX. TRANSPORTE X MES (COP)	SALARIO TOTAL X MES (COP)*
Trituración y Molienda	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Concentración	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Fundición	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
<b>Total</b>		<b>5</b>				<b>4.625.740</b>

\* El salario total asignado a los operarios y el supervisor corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019.

### • Aportes al Sistema General de Seguridad Social

El cálculo de aportes a cargo del empleador, con destino al Sistema General de Seguridad Social, se realizó con base en los sueldos básicos por mes que se indicaron en la tabla anterior.

Fórmula para calcular los aportes a seguridad social

**Aportes a seguridad social (\$/mes) = sueldo básico (\$) × % aportes (EPS, pensión, ARL)**

### • Aportes parafiscales

El cálculo de aportes parafiscales que corresponden a una contribución obligatoria del empleador con destino al Servicio Nacional de Aprendizaje, al Instituto Colombiano de Bienestar Familiar y a las cajas de compensación familiar, con el propósito de que dicho aporte permita a estas entidades ejecutar las labores para las cuales fueron creadas, se estimó conforme a los salarios básicos asignados a los empleados.

Fórmula para calcular los aportes a parafiscales

**Aportes parafiscales (\$/mes) = sueldo básico (\$) × % aporte (SENA, ICBF, CCF)**

### • Prestaciones sociales

El cálculo de la provisión mensual sobre el valor de la nómina, para el pago de prestaciones sociales a los trabajadores, se estimó con base en el salario mensual total asignado a cada operario.

Fórmula para calcular la provisión para pago de prestaciones sociales

**Provisión (\$/mes) = salario total (\$) × % de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)**

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

**Provisión para el pago intereses de cesantías (\$/mes) = cesantías (\$) × 12%**

**El cálculo de los aportes al SGSS y contribuciones parafiscales se debe realizar sobre la base del sueldo básico, es decir, sin tener en cuenta el auxilio de transporte, en tanto que la liquidación de las prestaciones sociales se debe tomar como base del cálculo del salario total, esto es, el sueldo básico más el auxilio de transporte.**

### • Mantenimiento de los bienes físicos de la fase de beneficio

En este rubro se cuantifican todos los gastos necesarios para conservar la maquinaria y los equipos de la planta de beneficio en buenas condiciones, a efectos de que trabajen con rendimiento normal durante su vida útil.

El costo del mantenimiento de la maquinaria y de los equipos se estableció como un porcentaje equivalente a 0,75% del valor comercial de la maquinaria (este valor incluye el costo del mantenimiento preventivo y correctivo y la compra de repuestos).

Fórmula para calcular el costo de mantenimiento  
**Costo de mantenimiento (\$) = valor comercial total (\$) × 0,75%**

### • Análisis y pruebas de laboratorio de la fase de beneficio

Este rubro comprende el costo de los ensayos de laboratorio que deben realizarse cada mes con el objetivo de disponer de información oportuna y veraz acerca de la eficiencia de las operaciones en cada uno de los procesos, así como de los impactos ambientales de tipo químico que se estén generando.

Figura 9.44. Ensayos, tipos de muestras y cantidades mínimas, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

PROCESOS	TIPO DE ENSAYO	TIPO DE MUESTRA	CANTIDAD (UNIDAD/MES)
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Ensayos al fuego	Cabeza general	26
CONCENTRACIÓN	Ensayos al fuego	Concentrado de mesa	26
	Ensayos al fuego	Superconcentrado	8
FUNDICIÓN	Ensayos al fuego	Fundido	8
MANEJO AMBIENTAL	Absorción atómica	Ambientales	4

Figura 9.43. Tablas de aportes a SGSS, parafiscales y prestaciones sociales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTE SGSS COP (\$)	DESCRIPCIÓN
EPS (salud)	\$ 70.390	Aporte total (12,5%): \$ 103.515 Aporte del empleador (8,5%): \$ 70.390 Aporte del trabajador (4%): \$ 33.125
Pensión (AFP)	\$ 99.374	Aporte total (16%): \$ 132.499 Aporte empleador (12%): \$ 99.374 Aporte trabajador (4%): \$ 33.125
ARL	\$ 57.637	Aporte total Riesgo V (6,96%): \$ 57.637 Aporte empleador: \$ 57.637
<b>Total:</b>	<b>\$ 227.401</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en la Ley 100 de 1993.

CONCEPTO	APORTES PARAFISCALES COP(S)	DESCRIPCIÓN
Caja de compensación familiar	\$ 33.125	Aporte total al CCF: (4%) a cargo del empleador
ICBF	\$ 24.843	Aporte total al ICBF: (3%) a cargo del empleador
SENA	\$ 16.562	Aporte total al SENA -: (2%) a cargo del empleador
<b>Total:</b>	<b>\$ 74.530</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en los porcentajes establecidos en el Código Sustantivo del Trabajo.

CONCEPTO	PRESTACIONES SOCIALES COP(S)	DESCRIPCIÓN
Cesantías (8,33%)	\$ 77.065	(8,33%): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Intereses de cesantías (12%)	\$ 9.251	(12%): corresponde al 12% sobre el valor a pagar de las cesantías
Prima de servicios (8,33%)	\$ 77.065	(8,33%): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Vacaciones (4,17%)	\$ 38.579	(4,17%): la ley del trabajo establece 15 días hábiles consecutivos de vacaciones anuales remuneradas
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 201.960</b>	

\* Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en Ley 1607 de 2012.

En la figura 9.44 se relacionan los tipos de ensayos, tipos de muestras y cantidades mínimas que se deben realizar en cada mes de la operación.

## Servicios públicos en la fase de beneficio

Es necesario precisar que en los costos indirectos de fabricación (CIF) usualmente se tienen en cuenta los costos de los servicios públicos. Sin embargo, en este ejercicio financiero se clasifica el costo del consumo de agua y energía como costos directos del proceso de operación, con el objetivo de establecer un punto de referencia para evaluar el aumento de consumo de energía que se generaría en la planta, a partir de la implementación de la propuesta tecnológica y estimar el costo del consumo de agua en el proceso de beneficio.

- **Costo de energía eléctrica**

En este rubro se cuantifica el costo de la energía eléctrica mensual que se consume en el proceso de beneficio.

El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la planta y el número de horas al día durante las cuales se utilizarían, de acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la planta de beneficio. La siguiente tabla contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

El costo total por energía eléctrica mensual se calcula con base en el consumo en kWh/mes, y la tarifa por kW que se paga a la empresa que suministra el servicio.

Fórmula para calcular el costo mensual de energía eléctrica

$$\text{Costo de la energía eléctrica (\$)} = \text{consumo energía (kW-h/mes)} \times \text{tarifa kW (\$)}$$

Figura 9.45. Costo de energía eléctrica, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

	EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA DE MOTOR hp	POTENCIA Kw	POTENCIA EFECTIVA Kw	HORAS TRABAJO	Kw/ DÍA	Kw/ MES
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Trituradora de quijadas	12	9,00	7,20	1	8	57,6	1.498
	Criba Vibratoria	2	1,50	1,20	1	8	9,6	250
	Trituradora de martillos	25	18,75	15,00	1	8	120	3.120
	Banda transportadora	3	2,25	1,80	1	8	14,4	374
	Molino de bolas primario	30	22,50	20,25	1	8	162	4.212
	Bomba de Sólidos	7,5	5,63	4,50	1	8	36	936
	<b>Total trituración y molienda</b>							<b>10.390</b>
CONCENTRACIÓN	Concentrador centrífugo	2	1,5	1,20	2	8	19,2	499
	Mesa gemini de refinación	1	1,5	1,20	1	8	9,6	250
	Tanque espesador	2	1,5	1,20	1	8	9,6	250
	<b>Total concentración</b>							<b>998</b>
MANEJO AMBIENTAL	Bomba de Sólidos	7,5	5,63	4,50	1	8	36	936
	<b>Total manejo ambiental</b>							<b>936</b>
							<b>Total</b>	<b>12.324</b>

- **Costo del agua**

En este rubro se cuantifica el costo por consumo de agua en el proceso de beneficio de la planta, de acuerdo con la tarifa reportada por la empresa prestadora del servicio en la zona.

Para determinar la cantidad de agua que se consume en el proceso de beneficio de la planta, el equipo técnico realizó un ejercicio experimental

**El método de línea recta está reconocido por la DIAN para efectos de descontar el valor de la depreciación de la base de cálculo del impuesto de renta y complementarios.**

basándose en un balance de masa hídrico, mediante el cual se logró establecer que el consumo específico de agua por tonelada de mineral procesado es de 0,53 m<sup>3</sup>.

Fórmula empleada para calcular el costo mensual de agua

$$\text{Costo del agua (\$)} = \text{consumo de agua (m}^3\text{/mes)} \times \text{tarifa m}^3\text{ (\$)}$$

- **Depreciación de maquinaria y equipo en la fase de beneficio**

En este rubro se valora la reducción del valor de la maquinaria como consecuencia de su uso. Debe tenerse en cuenta que, pese a que la depreciación no representa una salida de efectivo, este mecanismo debe considerarse a efectos de recuperar la inversión en activos fijos.

El valor de depreciación mensual de cada equipo se estimó por medio del método en línea recta, utilizando como referencia un tiempo de vida útil de diez años.

Fórmula para calcular la depreciación de la maquinaria y el equipo

$$\text{Costo de depreciación (\$)} = \text{valor comercial del equipo (\$)} / \text{tiempo de vida útil (meses)}$$

## Costos indirectos de la fase de beneficio

En este análisis, los costos indirectos de fabricación (CIF) se calculan en un 10% de la suma de los costos directos de la planta de beneficio.

Fórmula para calcular los CIF

$$\text{CIF (\$)} = \text{valor de costos directos (\$)} \times 10\%$$

## Costos totales de la fase de beneficio

Los costos totales de la operación mensual de la planta de beneficio se determinan mediante la suma de los costos directos e indirectos.

Fórmula para calcular el costo total

$$\text{Costos totales mensuales (\$)} = \text{total de los costos directos mensuales (\$)} + \text{total de los costos indirectos mensuales (\$)}$$

**El costo e ingreso unitario, es decir, el valor por cada gramo de oro, se calcula dividiendo el valor de los costos totales del mes sobre el número de gramos recuperados y viceversa.**

### 9.7.1.4. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE INGRESOS DE OPERACIÓN

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente los ingresos mensuales que se obtienen de la operación de la planta de beneficio, después de la implementación de la ruta metalúrgica 2. Para esto se debe multiplicar la cantidad de oro producido en gramos por el precio al que se vende cada gramo de oro.

## Ingresos por venta de oro recuperado en concentración gravimétrica

Para determinar los ingresos por venta de oro recuperado en el proceso de concentración gravimétrica es necesario empezar por estimar la cantidad de oro recuperado en esta operación unitaria.

La cantidad de oro recuperado mediante concentración gravimétrica se calcula mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

Fórmula para calcular la cantidad de oro por tonelada procesada recuperado mediante concentración gra-

vimétrica

**Oro recuperado por tonelada (g) = tenor (g) × % de recuperación total**

Una vez se ha determinado la cantidad de oro recuperado por cada tonelada de mineral procesada, se emplea la siguiente fórmula para establecer la cantidad de oro que se produce en un mes:

Fórmula para calcular la producción mensual de oro

**Producción mensual de oro (g) = oro recuperado por tonelada (g) × mineral procesado mensualmente (t)**

Finalmente, se utiliza la siguiente fórmula para determinar los ingresos mensuales por la venta de oro producido:

Figura 9.46. Porcentaje de recuperación por concentración gravimétrica y cantidad de oro. Fuente: autores.

CANTIDAD DE MATERIAL PROCESADO (t)	TENOR	RECUPERACIÓN TOTAL (%)*	CANTIDAD RECUPERADA (g/t)
1	7,7	100	7,7
1	7,7	70 %	5,39

\* Con la implementación de la propuesta tecnológica se puede alcanzar mínimo un 70 % de recuperación de oro por tonelada.\*\* Para la zona minera de Puerto Libertador (unidad geometalúrgica 2) se determinó que el tenor es de 7,7 gramos, por tonelada.

Fórmula para calcular los ingresos mensuales por venta de oro

**Ingresos totales mensuales (\$) = producción mensual de oro (g) × precio del oro (\$/g)**

## 9.7.2. EVALUACIÓN FINANCIERA

En esta sección se expone la metodología que se emplea en las dos etapas de la evaluación financiera y se presentan los supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de ingresos y costos de operación durante el horizonte definido para la evaluación del proyecto.

Recordemos que la evaluación financiera de proyectos comprende esencialmente dos etapas: la construcción del flujo de caja del proyecto y la aplicación de métodos de evaluación para establecer la conveniencia de emprender o no un proyecto.

### 9.7.2.1. CONSTRUCCIÓN DEL FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

El tiempo definido para evaluar la bondad financiera del proyecto, u horizonte de evaluación del proyecto, es de cinco años.

A continuación se explican los componentes del flujo de caja y los supuestos que se utilizaron para la proyección de ingresos y costos de operación de la planta de beneficio en cada uno de los años que comprende el horizonte de evaluación.

#### Inversión inicial

El monto de la inversión inicial se registra en la estructura del flujo de caja en el año cero. Esto se debe a que la inversión se realiza antes de poner en marcha el proyecto.

#### Ingresos gravables

Los ingresos gravables que se registran en el flujo de caja del proyecto son los mismos ingresos operacionales que resultan de la venta de oro y concentrados en cada año.

## Egresos deducibles

Los egresos deducibles que se registran en el flujo de caja del proyecto son los costos de operación, la depreciación y el pago de regalías.

La tasa para la liquidación de regalías por explotación de oro es del 4% sobre la producción en boca de mina, según lo establece el artículo 16 de la Ley 756 de 2002.

Fórmula para la liquidación de las regalías

**Regalías del año 1 (\$) = producción de oro año 1 (g) × precio fijado por el Banco de la República en el año 1 (\$/g) × 4%**

Supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de los egresos deducibles

- A partir del 2.º año, el costo de la materia prima (representado en el costo de extracción) aumenta en una proporción del 3% anual
- A partir del 2.º año, el costo de los insumos aumenta en una proporción del 2% anual
- A partir del 2.º año, el costo de mano de obra aumenta en una proporción del 4% anual
- A partir del 2.º año, el precio para la liquidación de las regalías aumenta en una proporción de 3% anual

Los demás costos de operación (mantenimiento, análisis y pruebas de laboratorio, servicios públicos y costos indirectos de fabricación) permanecen constantes en el horizonte de evaluación del proyecto, es decir que en cada año el costo en estos rubros es el mismo.

## Utilidad operacional

La utilidad operacional es la ganancia obtenida por la empresa, antes del pago de impuestos.

Fórmula para calcular la utilidad antes de pagar impuestos

**Utilidad operacional del año 1 (\$) = ingresos gravables en el año 1 (\$) – egresos deducibles en el año 1 (\$)**

## Margen de utilidad operacional

Este indicador determina el porcentaje que queda por cada peso de venta después de deducir todos los costos y gastos de la operación de la planta de beneficio.

Fórmula para calcular el margen de utilidad operacional

**Margen de utilidad operacional del año 1 (%) = (utilidad operacional en el año 1 (\$) / ingresos gravables en el año 1 (\$)) × 100**

## Impuestos

En el flujo de caja del proyecto se debe estimar el impuesto de renta, que corresponde a una contribución que grava el ingreso de las personas y entidades económicas. Este impuesto sobre la renta incluye el gravamen al trabajo, al capital y la combinación de ambos (Glosario minero, 2017).

En la última reforma tributaria, contenida en la Ley 1819 del 29 de diciembre de 2016, se estableció en 33% la tarifa general del impuesto de renta para las personas jurídicas.

Debe tenerse en cuenta que en el momento de la liquidación del impuesto de renta se toman como base

**Las regalías corresponden a una contraprestación económica que debe reconocerse al Estado por la explotación de un recurso natural no renovable. En este caso, las regalías se pagan por la producción de oro debido a que después de beneficiar el mineral, este no se regenera.**

**De conformidad con los artículos 58, 332 y 360 de las Constitución Política de Colombia de 1991, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación económica.**

los ingresos gravables generados en el último año y se descuenta el monto correspondiente a los costos de operación, o egresos deducibles.

Fórmula para calcular el impuesto de renta

$$\text{Impuesto de renta del año 1 (\$)} = \text{utilidad antes de pagar impuestos del año 1 (\$)} \times 33\%$$

### Utilidad neta

La utilidad neta es la ganancia obtenida por la empresa después de haber pagado impuestos.

Fórmula para calcular la utilidad neta

$$\text{Utilidad neta del año 1 (\$)} = \text{utilidad operacional del año 1 (\$)} - \text{impuesto de renta del año 1 (\$)}$$

### Margen de utilidad neta

Este indicador determina el porcentaje que queda por cada peso de venta, después de deducir todos los costos y gastos de la operación de la planta de beneficio, incluido el pago de impuesto de renta.

Fórmula para calcular el margen de utilidad neta

$$\text{Margen de utilidad neta del año 1 (\%)} = \frac{\text{utilidad neta del año 1 (\$)}}{\text{ingresos gravables en el año 1 (\$)}} \times 100$$

### Flujo neto de efectivo

Los flujos netos de efectivo son los beneficios futuros que genera el proyecto en cada año que comprende el horizonte de evaluación.

Fórmula para calcular el flujo neto de efectivo

$$\text{Flujo neto de efectivo en el año 1(\$)} = \text{utilidad neta en el año 1 (\$)} + \text{depreciación en el año 1 (\$)}$$

## 9.7.2.2. APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUAR PROYECTOS

Enseguida se presentan las fórmulas que se emplearon para calcular los indicadores de evaluación financiera del proyecto, ruta metalúrgica 2.

### Valor presente neto (VPN)

Para el cálculo del VPN se utilizaron dos tasas de descuento: la primera, equivalente al 30%, y la segunda, al 40%. Recordemos que la tasa de descuento (TD) se utiliza para trasladar los flujos netos de efectivo del futuro al presente.

Fórmula para calcular el VPN

$$\text{VPN} = (-) \text{ inversión inicial (\$)} + \frac{\text{FNE (\$)}_{\text{año 1}}}{(1+ \text{TD})^1} + \frac{\text{FNE (\$)}_{\text{año 2}}}{(1+ \text{TD})^2} \dots \frac{\text{FNE (\$)}_{\text{año 5}}}{(1+ \text{TD})^5}$$

### Tasa interna de retorno (TIR)

Fórmula para calcular la TIR

$$\text{TIR} = \frac{- \text{Inversión Inicial (\$)} + \sum_{t=1}^5 \text{FNE (\$)}}{\sum_{t=1}^5 (\text{TD}(\%)^t \times \text{FNE}(\$))}$$

### Relación beneficio/costo (RB/C)

Antes de calcular la relación beneficio/costo se requiere estimar el valor presente neto (VPN) de los beneficios y de los costos. Para esto se utilizaron dos tasas de descuento: la primera, equivalente al 30%, y la segunda, del 40%.

Fórmulas para calcular el valor presente de los ingresos y de los costos

$$\text{VPN Ingresos} = \frac{\text{Ingresos operacionales año 1}}{(1+ \text{TD})^1} + \frac{\text{Ingresos operacionales año 2}}{(1+ \text{TD})^2} \dots \frac{\text{Ingresos operacionales año 5}}{(1+ \text{TD})^5}$$

$$\text{VPN Costos} = \frac{\text{Costos operacionales año 1}}{(1+ \text{TD})^1} + \frac{\text{Costos operacionales año 2}}{(1+ \text{TD})^2} \dots \frac{\text{Costos operacionales año 5}}{(1+ \text{TD})^5}$$

Después de estimar el valor presente neto (VPN) de los ingresos y de los costos se procede a calcular la relación beneficio/costo (RB/C) a partir de la aplicación de la siguiente fórmula:

Fórmula para calcular la relación beneficio/costo (RB/C)

$$\text{Relación beneficio/costo} = \frac{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN}_t \text{ Ingresos}(\$))}{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN}_t \text{ Costos}(\$))}$$

Debe tenerse en cuenta que para el cálculo de la RB/C, en los costos operacionales no se considera la depreciación de los bienes físicos y la maquinaria.

## 9.8. ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 2

En esta sección se presentan los resultados del ejercicio financiero, el monto de recursos económicos que se requieren para la inversión inicial, los costos totales y el valor de la producción en función de los parámetros de operación definidos para la mina y la planta, y los indicadores que comprueban la viabilidad financiera del proyecto, de acuerdo con las condiciones iniciales típicas en la zona.

Figura 9.47. Inversión inicial, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COSTO COP (\\$)*	% PARTICIPACIÓN SOBRE COSTOS TOTALES
<b>Activos fijos</b>		
Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de extracción	142.724.021	18 %
Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de beneficio	585.504.515	75 %
Instalaciones eléctricas e hidráulicas	48.747.200	6 %
<b>Total activos fijos</b>	<b>776.975.736</b>	

(\*) Los precios cotizados se encuentran detallados en el informe técnico.

Figura 9.48. Costos de la fase de extracción, por mes, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP \\$	
Mantenimiento	1.070.430	5.146
Depreciación de maquinaria y equipo	1.189.367	5.718
Energía eléctrica	1.255.850	6.038
Partes y accesorios	3.631.910	17.461
Herramientas y suministros	4.055.470	19.497
Elementos de seguridad industrial	4.265.015	20.505
Mano de obra	14.290.352	68.704
Combustible y explosivos	20.229.206	97.256
<b>Total</b>	<b>49.987.600</b>	<b>240.325</b>

(\*) El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 234.607/t.

Figura 9.49. Estructura de los costos futuros de la fase de extracción de oro, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

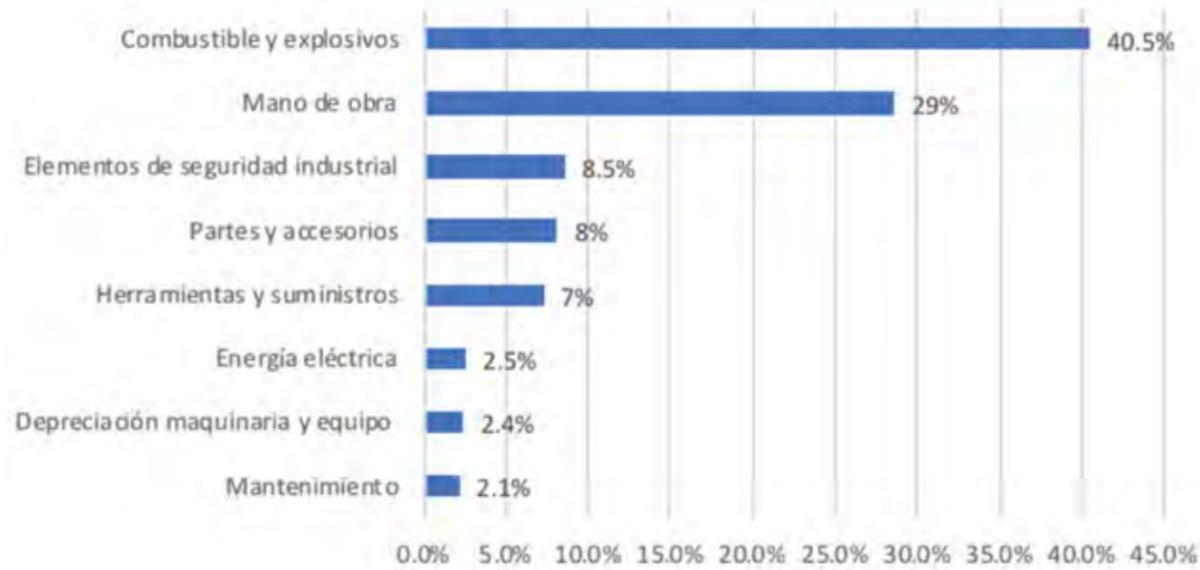


Figura 9.50. Costos de operación total (extracción + beneficio), por mes, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
Materia prima (costo de extracción)	48.798.233
Insumos	5.845.692
Mano de obra	7.145.195
Mantenimiento	4.391.284
Análisis y pruebas de laboratorio	10.400.000
Servicios públicos	7.255.308
Depreciación	6.068.571
<b>Total costos directos</b>	<b>89.904.282</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	8.990.428
<b>Total costos directos + indirectos</b>	<b>98.894.710</b>

Figura 9.51. Estructura de los costos futuros de la fase de beneficio de oro, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

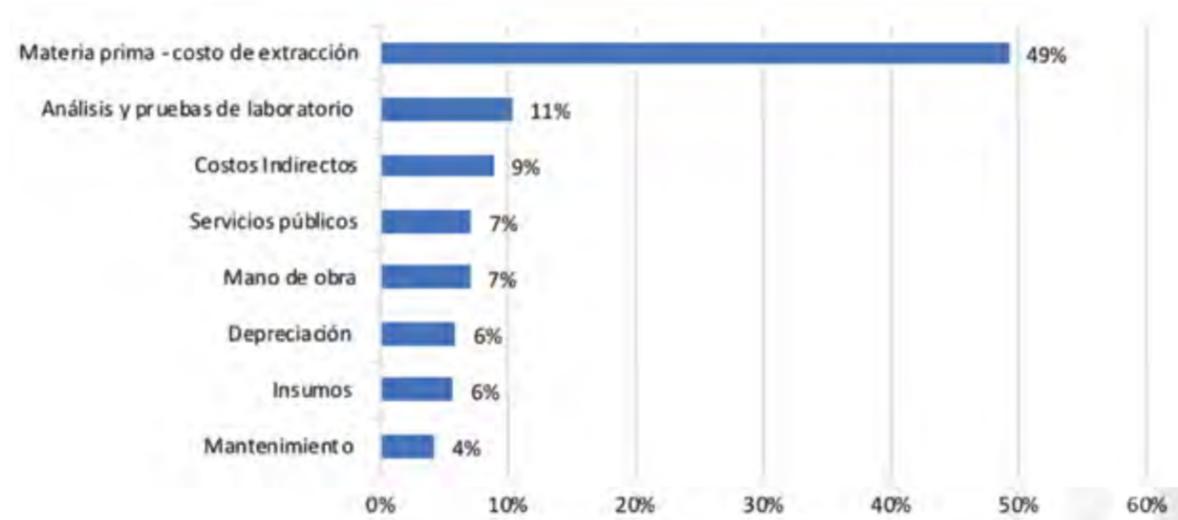


Figura 9.52. Ingresos de operación futura, por mes, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

TENOR (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
7,7	70	5,39	1.121	119.815	134.326.993

\* Corresponde al precio promedio internacional del oro en 2018. Fuente: cálculo propio con base en información del equipo técnico y el Banco de la República.

Figura 9.53. Flujo de caja del proyecto en horizonte de evaluación (5 años), ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

CONCEPTO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(1) INVERSIÓN INICIAL (-)	-776,975,736					
<b>TOTAL INVERSIÓN INICIAL</b>	<b>-776,975,736</b>					
(2) INGRESOS GRAVABLES (+)						
Ingresos Operacionales		1,611,923,914	1,660,281,631	1,710,090,080	1,761,392,782	1,814,234,566
<b>TOTAL INGRESOS GRAVABLES</b>		<b>1,611,923,914</b>	<b>1,660,281,631</b>	<b>1,710,090,080</b>	<b>1,761,392,782</b>	<b>1,814,234,566</b>
(3) EGRESOS DEDUCIBLES (-)						
Costos Operacionales		1,113,913,672	1,138,553,697	1,163,955,218	1,190,142,278	1,217,139,699
Regalías (4%)		51,581,565	53,129,012	54,722,883	56,364,569	58,055,506
Depreciación		72,822,854	72,822,854	72,822,854	72,822,854	72,822,854
<b>TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES</b>		<b>1,238,318,090</b>	<b>1,264,505,563</b>	<b>1,291,500,954</b>	<b>1,319,329,701</b>	<b>1,348,018,059</b>
(4) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS		373,605,823	395,776,068	418,589,126	442,063,082	466,216,507
(5) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL		23.2%	23.8%	24.5%	25.1%	25.7%
(6) IMPUESTOS (-)						
IMPUESTO DE RENTA (33%) (-)		123,289,922	130,606,102	138,134,412	145,880,817	153,851,447
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>		<b>123,289,922</b>	<b>130,606,102</b>	<b>138,134,412</b>	<b>145,880,817</b>	<b>153,851,447</b>
(7) UTILIDAD NETA		250,315,902	265,169,966	280,454,715	296,182,265	312,365,060
(8) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA		15.5%	16.0%	16.4%	16.8%	17.2%
(9) DEPRECIACIÓN (+)		72,822,854	72,822,854	72,822,854	72,822,854	72,822,854
<b>(10) FLUJO NETO DE EFECTIVO</b>	<b>-776,975,736</b>	<b>323,138,755</b>	<b>337,992,819</b>	<b>353,277,568</b>	<b>369,005,118</b>	<b>385,187,913</b>

## 9.8.1. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES DE EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 2

El VPN del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador correspondiente a la ruta metalúrgica 2, a una tasa de descuento del 20%, es de COP 264.219.073

El VPN del proyecto de la zona minera de Puerto Libertador correspondiente a la ruta metalúrgica 2, a una tasa de descuento del 30%, es de COP 65.329.527

Teniendo en cuenta que el VPN es mayor que cero (para ambas tasas de descuento), se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista financiero, pues los dineros invertidos en el miso rinden más que estas tasas de interés de oportunidad.

La TIR anual obtenida es mayor que las dos tasas de interés de oportunidad del inversionista definidas en este proyecto como el 20 y 30% anuales. Se concluye que este proyecto se justifica desde el punto de vista financiero, en la medida en que los dineros que permanecen invertidos en el proyecto rinden a una tasa superior al costo de oportunidad definido.

Figura 9.54. Indicadores ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	TASA DE DESCUENTO 20 %	TASA DE DESCUENTO 30 %
Valor presente neto (VPN)	\$264.219.073	\$65.329.527
Tasa interna de retorno (TIR)	34 %	34 %
Relación beneficio/costo (RB/C)	1,47	1,46

Para este proyecto, la relación beneficio/costo a tasas de interés de oportunidad del 30 y 40% es de 8,90 y 8,89, respectivamente. De este resultado se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista financiero, pues los beneficios son mayores que los costos.

## 9.9. ESTUDIO FINANCIERO DE LA OPERACIÓN ACTUAL CON LA OPERACIÓN FUTURA EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 2

En esta sección se exponen los resultados del estudio financiero de la operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador, a partir de los cuales se estableció una base de comparación (en términos de porcentaje de recuperación, cantidad de oro recuperado, costo unitario de producción, margen de utilidad operacional y de utilidad neta), para analizar la viabilidad económica de la implementación de la ruta metalúrgica 2.

Figura 9.55. Variables de operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador. Fuente: autores.

VARIABLE	VALOR
Tiempo de trabajo en mina	8 h/día
Volumen de material de mina extraído	3,75 t/día
Volumen de material estéril extraído	0,75 t/día
Volumen de material mineral extraído	3 t/día
Capacidad de procesamiento	0,375 t/h
Funcionamiento de la planta	8 h/día
Volumen de procesamiento	3 t/día
Turnos por día	1 por día
Días de operación al mes	20 días
Volumen de procesamiento	60 t/mes
Tenor por tonelada de material de mina	7,7 g/t
Porcentaje total de recuperación de oro	50 %
Recuperación total de oro	3,85 g/t

Debe tenerse en cuenta que las variables de la operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona se definieron a partir de la información recolectada en trabajo de campo por el equipo técnico.

Figura 9.56. Costos actuales de la fase de extracción, por mes. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP \$	COP \$/t (*)
Mano de obra	7.145.176	119.086
Partes y accesorios	651.773	10.863
Herramientas y suministros	1.361.340	22.689
Combustible y explosivos	2.451.665	40.861
Elementos de seguridad industrial	1.300.346	21.672
Mantenimiento	555.932	9.266
Energía eléctrica	469.219	7.820
Depreciación maquinaria y equipo	926.554	15.443
<b>Total</b>	<b>14.862.005</b>	<b>247.700</b>

\* El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 232.258/t.

### 9.9.1. RESULTADOS DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR

Figura 9.57. Estructura de costos actuales de la fase de extracción de oro. Fuente: autores.



Figura 9.58. Estructura de costos actuales de la fase de extracción de oro. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
Materia prima	13.935.451
Insumos	683.801
Mano de obra	2.858.070
Mantenimiento	270.200
Servicios públicos	1.263.119
Depreciación de maquinaria y equipo	1.376.887
<b>Total costos directos</b>	<b>20.387.530</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	2.038.753
<b>Total costos directos + indirectos</b>	<b>22.426.283</b>

Figura 9.59. Estructura de los costos actuales de la fase de beneficio. Fuente: autores.



Figura 9.60. Ingresos de la operación actual, por mes, situación actual. Fuente: autores.

TENOR (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
7,7	50	3,85	231	119.815	27.677.265

(\*) Corresponde al precio promedio internacional del oro en 2018. Fuente: cálculo propio con base en información del equipo técnico y el Banco de la República.

Figura 9.61. Flujo de caja de la operación actual en el horizonte de evaluación (5 años). Fuente: autores.

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(1) INGRESOS GRAVABLES (+)					
Ingresos Operacionales	332,127,180	342,090,995	352,353,725	362,924,337	373,812,067
<b>TOTAL INGRESOS GRAVABLES</b>	<b>332,127,180</b>	<b>342,090,995</b>	<b>352,353,725</b>	<b>362,924,337</b>	<b>373,812,067</b>
(2) EGRESOS DEDUCIBLES (-)					
Costos Operacionales	252,592,746	259,800,769	267,238,319	274,912,847	282,832,056
Depreciación	16,522,647	16,522,647	16,522,647	16,522,647	16,522,647
Regalías	10,628,070	10,946,912	11,275,319	11,613,579	11,961,986
<b>TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES</b>	<b>279,743,462</b>	<b>287,270,328</b>	<b>295,036,285</b>	<b>303,049,073</b>	<b>311,316,689</b>
(3) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	52,383,718	54,820,668	57,317,441	59,875,264	62,495,378
(4) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL	15.77%	16.03%	16.27%	16.50%	16.72%
(5) IMPUESTOS (-)					
IMPUESTO DE RENTA (33%) (-)	17,286,627	18,090,820	18,914,755	19,758,837	20,623,475
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>	<b>17,286,627</b>	<b>18,090,820</b>	<b>18,914,755</b>	<b>19,758,837</b>	<b>20,623,475</b>
(6) UTILIDAD NETA	35,097,091	36,729,847	38,402,685	40,116,427	41,871,903
(7) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA	10.57%	10.74%	10.90%	11.05%	11.20%
(8) DEPRECIACIÓN (+)	16,522,647	16,522,647	16,522,647	16,522,647	16,522,647
<b>(9) FLUJO NETO DE EFECTIVO</b>	<b>51,619,738</b>	<b>53,252,494</b>	<b>54,925,332</b>	<b>56,639,074</b>	<b>58,394,550</b>

Los supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de ingresos y costos de operación actual son los mismos que se definieron para la operación futura de la mina y planta de beneficio típicas de la zona.

## 9.9.2. RESUMEN DE INDICADORES DE LA OPERACIÓN ACTUAL VS. LA OPERACIÓN FUTURA, RUTA METALÚRGICA 2

Figura 9.62. Indicadores de la operación actual vs. la operación futura, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

INDICADOR	OPERACIÓN ACTUAL	OPERACIÓN FUTURA
Recuperación de oro (gr/t)	50%	70 %
Cantidad de oro recuperado por tonelada	3,85 gr	5,39 gr
Costo de producción unitario por gramo de oro	COP 97.083	COP 88.211
Costo de producción unitario por onza troy de oro	USD 1007	USD 915
Utilidad antes de impuestos por gramo de oro	COP 18.897	COP 27.770
Utilidad antes de impuestos por onza troy de oro	USD 195,9	USD 288
Margen de utilidad operacional (promedio 5 años)	29,7%	24,5 %
Utilidad después de impuestos por gramo de oro	COP 12.661	COP 18.606
Utilidad después de impuestos por onza troy de oro	USD 131,3	USD 193
Margen de utilidad neta (promedio 5 años)	10,9%	16,4%
Indicador de productividad (producto/insumo)	1,23	1,36

Precio de venta por gramo de oro: COP 119.815. Precio de venta por onza de troy de oro: USD 1242. Tasa de cambio utilizada: COP 3000/USD. Factor de conversión utilizado: 1 onza troy = 31,1034768 gramos

## 9.9.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS. OPERACIÓN FUTURA EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 2

La adopción integral de la ruta metalúrgica 2 como una alternativa para mejorar los niveles de eficiencia en el proceso de beneficio de oro permite a la empresa minera incrementar la productividad total en aproximadamente 10,5%, al pasar de una razón producto/insumo total de 1,23 en las condiciones de la producción actual de la mina y la planta de beneficio típicas de la zona, a una razón de productividad de 1,36 con la implementación de la ruta metalúrgica propuesta.

Esto corrobora la generación de beneficios económicos a la empresa minera y se espera que represente, desde el punto de vista financiero, un incentivo para que el empresario adopte la presente propuesta y desarrolle su operación bajo el estricto cumplimiento de los estándares técnico-administrativos y legales.

Cabe resaltar que se estableció que en el escenario de producción actual el costo unitario de producir un gramo de oro es de aproximadamente COP 97.083, mientras que se espera que, en la operación futura, el costo unitario del gramo de oro sea de COP 88.211. Este resultado indica una reducción efectiva de los costos unitarios de 9,13%.

Esta reducción de costos unitarios de producción con la implementación de la ruta metalúrgica 2, junto con el aumento de los ingresos por el aumento en la cantidad de oro recuperado, resulta en un aumento del margen de utilidad neta proyectada para los cinco años evaluados, al pasar de 10,9%, en la actualidad, a 16,4%, en la operación futura.

Como anexo a la presente guía encontrará un simulador en formato Excel en el que podrá introducir las variables de operación deseadas (según las características propias de la mina y de la planta de beneficio) y efectuar un ejercicio de planeación financiera para estimar los costos unitarios de operación, los márgenes de utilidad operacional y determinar los rendimientos futuros de la inversión necesaria para la implementación de la ruta metalúrgica 2.

En el escenario actual de la operación de la mina y la planta de beneficio típicas de la zona minera de Puerto Libertador, el costo unitario de producir 1 g de oro es de COP 97.083, mientras que la implementación de la ruta metalúrgica 2 reduce este costo a COP 88.211.

Esta disminución, junto con el aumento de los ingresos por un porcentaje de mayor recuperación de oro, se traduce en un incremento de la utilidad neta de 47%.

## 9.10. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR

- En el estudio financiero de la operación actual de la planta se utilizó como referencia un porcentaje de recuperación de oro de 50% por cada tonelada de mineral procesado, obteniéndose este en el proceso de concentración gravimétrica, de acuerdo con la información colectada en campo por el equipo técnico.
- Teniendo en cuenta que el tenor de la zona minera de Puerto Libertador es de 7,7 gramos por tonelada y que la operación actual permite una recuperación promedio del 50%, en el estudio financiero se estimó una recuperación de 3,85 gramos por cada tonelada de mineral beneficiada.
- El costo por materia prima, definido en este ejercicio como costo de extracción del mineral por cada tonelada, es de COP 232.258/t, excluyendo el costo por la depreciación de bienes físicos.
- Los rubros más representativos en la estructura de costos de la fase de extracción del mineral son la mano de obra y la compra de combustibles y explosivos, cada uno con una participación sobre los costos totales de 48,1 y 16,5%, respectivamente.
- Los rubros más representativos en la estructura de costos de la operación actual de la planta son la materia prima y la mano de obra, cada uno con una participación sobre los costos totales de 62,1 y 12,7%, respectivamente.
- Se estableció que la planta de beneficio tiene un consumo de agua por cada tonelada de mineral procesado de aproximadamente 0,53 m<sup>3</sup>.
- El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la mina y en la planta de beneficio, así como del número de horas al día durante las cuales se utilizarían. De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la mina y la planta de beneficio, el consumo de energía actual es de 2.928 kW/mes, lo que equivale a un costo promedio de energía eléctrica mensual de COP 1.683.600.
- El costo unitario aproximado, teniendo en cuenta los parámetros de la operación actual definidos para la planta, es de COP 97.083 por cada gramo de oro y de USD 1.007 por cada onza troy de oro.
- El precio de venta que se utilizó como referencia para el estudio financiero de la operación actual corresponde al precio del oro promedio internacional en el año 2018. Este precio es de COP 119.815/g y de USD 1.242/onza troy.
- La ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) aproximada es de COP 18.897/g de oro y de USD 195,9 / onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 29,7%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- La ganancia unitaria (después de pagar impuestos) aproximada es de COP 12.661/g de oro y de USD 131,3/ onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 10,9%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.

## 9.11. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN FUTURA DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE PUERTO LIBERTADOR, RUTA METALÚRGICA 2

- Se estableció un potencial de procesamiento anual de las plantas de beneficio de la zona, después de la implementación de la ruta metalúrgica 2, de 2.496 toneladas de mineral, lo cual implica un funcionamiento de la planta de 26 días al mes y un procesamiento de 8 toneladas de mineral al día.
- La implementación de la propuesta de adecuación tecnológica para mejorar la eficiencia del proceso de beneficio del oro permite alcanzar hasta un 70%.
- Teniendo en cuenta que el tenor del material de cabeza promedio que se procesa en la planta es de 7,7 gramos, y que la implementación de la ruta metalúrgica 2 en la operación futura permite una recuperación mínima aproximada de 70%, se espera una recuperación de 5,39 gramos por cada tonelada de mineral beneficiado, que iría directamente a fundición.
- A partir de las características de las minas y plantas típicas de la zona, y de las variables de operaciones definidas por el equipo técnico, se realizó un inventario de la maquinaria y de los equipos nuevos que se deben adquirir para mejorar algunos de los procesos que se están desarrollando en la operación de extracción del mineral y en la planta de beneficio, con el fin de implementar los nuevos procesos que se detallan en la ruta metalúrgica contenida en esta guía. El monto de recursos que deberán invertirse para la adecuación es de COP 776.975.736.
- El inventario de maquinaria y equipo nuevos, tanto para la fase de extracción del mineral como para la fase de beneficio, con sus respectivas especificaciones técnicas, se determinó a partir del inventario inicial de las minas y las plantas de beneficio típicas de la zona. Esto se hizo con el objetivo de evitar costos innecesarios y optimizar los recursos disponibles para la inversión.
- Los rubros más representativos de la estructura de costos de la fase de extracción son el costo de los explosivos y el combustible, y la mano de obra, cada uno con una participación sobre los costos totales de 40,5 y 29%, respectivamente.
- Los rubros más representativos de la estructura de costos total de la operación futura de la planta son el costo de extracción y el costo de los análisis y pruebas de laboratorio, cada uno con una participación sobre los costos totales de 49 y 11%, respectivamente.
- El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la mina y en la planta de beneficio, y del número de horas al día durante las cuales se utilizarían. De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos, el consumo de energía de toda la operación es de 14.508 kW/mes.
- A partir de experimentos de laboratorio efectuados por el equipo técnico se determinó la dosificación adecuada de los insumos y elementos químicos que se deben utilizar en cada uno de los procesos de la operación de beneficio.
- El costo unitario aproximado que se puede alcanzar con la implementación de la propuesta de adecuación es de COP 88.211 por cada gramo de oro, y de USD 915 por cada onza troy.
- El costo de los análisis y pruebas de laboratorio que se deben realizar para tener el control de la eficiencia de cada uno de los procesos de la operación y los impactos ambientales asociados a elementos tóxicos que se pueden generar puede racionalizarse con la inversión futura en el montaje de un laboratorio. Se prevé que este laboratorio puede tener una demanda potencial de las empresas mineras de la zona.

- El precio de venta que se utilizó como referencia para el estudio financiero de la operación futura corresponde al precio del oro promedio internacional en el año 2018. Este precio es de COP 119.815/g y de USD 1242/onza troy.
- Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) de COP 27.770/g de oro y de USD 288/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 24,5%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria neta (después de pagar impuestos) de COP 18.606/g de oro y de USD 193/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 16,4%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- Se estableció que la inversión en adecuación de las plantas de beneficio de la zona minera de Puerto Libertador a partir de la implementación de la ruta metalúrgica 2, se justifica desde el punto de vista financiero, ya que los resultados de los indicadores demuestran que los beneficios son mayores que los costos, incluyendo la inversión inicial, y que los dineros invertidos en el proyecto rinden más que las tasas de interés de oportunidad de 20 y 30% anuales.
- El período de recuperación de la inversión en adecuaciones con las tasas de interés de oportunidad del 20 y 30% anuales es de aproximadamente 2,5 años.

# 10. GLOSARIO

El objetivo de este glosario es unificar los conceptos técnicos que se emplean en el contenido de la guía, con la intención de que los mineros a quienes está dirigida se apropien y apliquen los términos correctos frecuentes en su actividad productiva.

---

Equipo técnico del SGC realizando su recorrido por las fuentes hídricas de la zona. Fotografía tomada por Oscar González, Servicio Geológico Colombiano



---

## Aa

---

**Acopio.** 1. Acción y el efecto de acopiar o reunir. 2. Se entiende como el sitio donde se ubican los minerales que se extraen.

**Acotar.** Hacer o poner números o cotas en un croquis, mapa topográfico, plano, etc.

**Actividad económica.** Es la creación de valor agregado mediante la producción de bienes y servicios en la que intervienen la tierra, el capital, el trabajo y los insumos intermedios.

**Activo.** Conjunto de todos los bienes y derechos con valor monetario que son propiedad de una empresa, institución o individuo, y que se reflejan en su contabilidad.

**Adecuación ambiental.** Acción de manejo o corrección destinada a hacer compatible una actividad, obra o proyecto con el ambiente, o para que no lo altere significativamente.

**Administradora de riesgos profesionales (ARP).** Entidad aseguradora de riesgos profesionales reglamentada por el Decreto 1722 de 1994, que se refiere a la afiliación y a las cotizaciones del Sistema General de Riesgos Laborales.

**Agua de drenaje de mina.** Aguas que se bombean en los frentes de trabajo de minería, bien sea a cielo abierto o subterráneos.

**Agua subterránea.** Agua del subsuelo que ocupa la zona saturada.

**Alteración.** 1. Cambio en la composición química o mineralógica de una roca, producido generalmente por meteorización o por acción de soluciones hidrotermales. 2. En general, el término se refiere a cambios físicos o químicos experimentados por rocas y minerales después de su formación, promovidos por procesos exógenos como meteorización, o por procesos endógenos como magmatismo o fallamiento.

**Alteración argílica.** Tipo de alteración hidrotermal, también denominada argílica intermedia, caracterizada por la presencia de caolinita o montmorillonita.

**Alteración filica.** Tipo de alteración hidrotermal, también denominada cuarzo sericítica, o simplemente sericítica, caracterizada por el desarrollo de sericita y cuarzo secundario. Es el resultado de una hidrólisis moderada a fuerte de los feldspatos, en un rango de temperatura de 300 a 400 °C.

**Alteración potásica.** Alteración desarrollada en presencia de soluciones casi neutras y a altas temperaturas (400 a 600 °C), que se caracteriza por la formación de nuevos silicatos de potasio, como feldespato potásico secundario o mica (biotita) secundaria, con posible presencia de anhidrita.

**Amortización.** Reconocimiento contable de la pérdida gradual de valor de un activo fijo a lo largo de su vida física o económica. Los activos amortizables permiten dar como gasto del ejercicio un porcentaje de su valor.

**Análisis.** Proceso de identificar una pregunta, modelar un evento, investigar modelos, interpretar resultados y dar recomendaciones.

**Ancho mínimo para explotación.** Es el ancho mínimo horizontal que permite explotar una veta, según el equipo que se utilice. Si el ancho de la veta es menor que el ancho mínimo de minado, durante la explotación el tajo correspondiente tiene que ampliarse a este último ancho, lo que ocasiona una dilución.

**Arcilla.** 1. El término hace referencia a rocas sedimentarias y, en general, a un material terroso de grano fino que se hace plástico al ser mezclado con una cantidad limitada de agua. Las arcillas son siempre de grano muy fino, y el límite superior en el tamaño de los granos corresponde, por lo general, a un diámetro de 0,004 mm (menores de 4  $\mu$ m). En mineralogía y petrografía sus variedades se conocen como arcillolitas.

**Arena (rocas sedimentarias).** Término textural usado para designar materiales o partículas producto de la desintegración natural o artificial de rocas preexistentes. Su tamaño oscila entre 0,0625 y 2 mm de diámetro.

**Arenisca.** Roca sedimentaria detrítica terrígena compuesta como mínimo por un 85% de materiales tamaño arena, generalmente granos de cuarzo más o menos redondeados, con tamaños entre 0,0625 y 2 mm. Son rocas comunes y se constituyen en componente esencial de numerosas series estratigráficas, en capas regulares o irregulares, y también en lentejones. El color de estas rocas varía de blanco a gris claro, o pueden encontrarse diversamente coloreadas, según la naturaleza del cemento, como rojo (óxidos de hierro), verde (glauconita) y otros. Las variedades se distinguen por el tamaño del grano, la naturaleza del cemento o la presencia de elementos particulares. Su mineral esencial es el cuarzo; sus minerales accesorios, el feldespato, micas, cemento silíceo, de óxidos de hierro y de calcita. A veces contiene minerales pesados, como el rutilo, entre otros. Su textura es de grano medio y redondeado. Su distribución es homogénea y pocas veces contienen fósiles.

**Arranque.** El arranque de un mineral es la fragmentación del macizo rocoso hasta reducirlo a un tamaño que permita su manipulación para ser cargado y transportado. El arranque puede ser realizado con métodos mecánicos (forma continua y discontinua) y también por medio de la perforación con sustancias explosivas (forma discontinua).

**Arranque mecánico.** En este tipo de arranque se usan máquinas que utilizan los impactos, la roza, la fuerza hidráulica, el rípiado o la excavación para desprender el mineral. En minería subterránea se usan máquinas de impacto tales como martillo hidráulico, martillo eléctrico y martillo neumático.

**Autoridad ambiental.** Es la autoridad que tiene a su cargo fiscalizar los recursos naturales renovables; aprobar estudios de impacto ambiental; adoptar términos y guías; aprobar o no la licencia ambiental, de acuerdo con el artículo 195 de la Ley 685 del 2001; delimitar geográficamente las reservas forestales; sancionar de acuerdo con las normas ambientales, y recibir los avisos de iniciación y terminación de las explotaciones mineras.

**Autoridad minera.** Es el Ministerio de Minas y Energía o, en su defecto, la autoridad nacional que, de conformidad con la organización de la Administración Pública y la distribución de funciones entre los entes que la integran, tiene a su cargo la administración de los recursos mineros, la promoción de los aspectos atinentes a la industria minera, así como la administración del recaudo y distribución de las contraprestaciones económicas, con el fin de desarrollar las funciones de titulación, registro, asistencia técnica, fomento, fiscalización y vigilancia de las obligaciones emanadas de los títulos y solicitudes de áreas mineras.

**Azimut.** 1. Dirección de una línea medida en sentido de las agujas del reloj, referida a un sistema de referencia, usualmente la red de meridianos. 2. Ángulo medido en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte; su valor está comprendido entre 0 y 360 grados sexagesimales (400 grados centesimales). Se denomina “rumbo” si se mide con respecto al norte magnético, mientras que se emplea el término azimut geográfico si se mide con respecto al norte geográfico. 3. Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.

---

## Bb

---

**Barequeo.** Lavado de arenas por medios manuales, sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos, con el objeto de separar y recoger metales preciosos contenidos en dichas arenas. También puede aplicarse a la recolección de piedras preciosas y semipreciosas.

**Barrena.** 1. Herramienta que se usa para perforar. 2. Parte de una herramienta de perforación que corta la roca. Se le llama barreno a un agujero practicado en una roca, que se rellena de pólvora u otro explosivo, para hacerla volar.

**Barretero.** Minero que con una barrena y una maceta, una porra o un martillo pesado, abre orificios (barrenos) que se llenan de pólvora u otros explosivos que, al estallar, sueltan los minerales de la roca.

**Bauxita.** Roca formada por óxidos de aluminio y de hierro hidratados (fórmula  $Al_2O_3 \cdot xH_2O$ ) que suele presentar aspecto terroso, arcilloso o pisolítico, con colores que van del blanco sucio al pardo, con zonas más oscuras. Es la única mena comercial del aluminio. Su composición química es variable en el detalle, y define su calidad industrial. Las bauxitas se explotan para la extracción metalúrgica del aluminio, del que son la única mena. Los principales yacimientos de bauxita se localizan en Australia, Brasil, Guayana y Surinam.

**Beneficio de minerales.** Conjunto de operaciones empleadas para el tratamiento de menas y minerales por medios físicos y mecánicos, con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados a partir de las diferencias en sus propiedades.

**Bienes finales.** Bienes y servicios que conforman la demanda final; son aquellos cuyo proceso de producción se ha concluido en el periodo y están disponibles para su utilización; la mayor parte ha sido técnicamente terminada, es decir, no será objeto de una nueva transformación en el periodo.

**Bioacumulación.** Es el proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos, de forma que alcanzan concentraciones más elevadas que las concentraciones en su medio o en los alimentos. Las sustancias propensas a la bioacumulación alcanzan concentraciones crecientes a medida que se avanza en el nivel trófico en la cadena alimenticia.

**Biogeoquímico(a).** Interacción entre los compuestos geoquímicos y los organismos vivos. La biogeoquímica es necesaria para comprender el funcionamiento de los seres vivos, desde el nivel de organización celular hasta el ecosistema que conforman. Además, esta ciencia permite comprender el porqué de muchos de los problemas ambientales (cambio climático, destrucción de la capa de ozono, contaminación ambiental), y de procesos esenciales para la sociedad (producción de cultivos, reciclaje de residuos, depuración ambiental). El desarrollo de la biogeoquímica se adapta muy bien a aquellas regiones que presentan una vegetación muy densa y donde la cartografía geológica es difícil de ser llevada a cabo por ausencia de afloramientos.

**Bocamina.** 1. La entrada a una mina, generalmente consistente en un túnel horizontal. 2. Sitio en superficie por donde se accede a un yacimiento mineral.

**Bomba (equipo).** 1. Máquina para evacuar agua u otro líquido, accionada eléctrica o neumáticamente. 2. Aparato mecánico utilizado para transferir líquidos o gases de un lugar a otro, por ejemplo, la bomba de Cornualles (tipo de bomba desarrollada en Cornualles, Inglaterra, utilizada en el siglo XIX en minas profundas para elevar agua subterránea) o la bomba de trasiego. 3. Aparato mecánico para comprimir o atenuar gases.

**Broca.** 1. Aparato o herramienta utilizada para el corte de suelos y rocas, utilizada en perforaciones o sondeos del subsuelo, que se ensambla en la parte final de la sarta de perforación.

**Buzamiento (geología general).** Ángulo de inclinación que forma un filón, estructura o capa rocosa con un plano horizontal, medido perpendicularmente a la dirección o rumbo del filón.

---

## Cc

---

**Capacidad minera instalada.** Es la máxima cantidad de producción que una mina ha sido diseñada para producir.

**Capital.** 1. Stock de recursos disponibles en un momento determinado para la satisfacción de necesidades futuras; es decir, es el patrimonio poseído susceptible de generar una renta. Constituye uno de los tres principales elementos que se requieren para producir un bien o un servicio. 2. Es la suma de todos los recursos, bienes y valores movilizados para la constitución y la puesta en marcha de una empresa.

**Capital de inversión.** Es la suma de todos los recursos, bienes y valores movilizados para la constitución y la puesta en marcha de una empresa. Es su razón económica. Cantidad invertida en una empresa por los propietarios, socios o accionistas.

**Canteras de formación de aluvi6n.** Llamadas también canteras fluviales. Corresponden a las canteras situa-

das en las laderas de ríos, donde éstos, como agentes naturales de erosión, transportan durante grandes recorridos las rocas y aprovechan su energía cinética para depositarlas en zonas de menor potencialidad para formar grandes depósitos de estos materiales, entre los cuales se encuentran desde cantos rodados y gravas hasta arena, limos y arcillas. En el entorno ambiental, una cantera de aluvión tiene mayor aceptación en terrazas alejadas del área de influencia del cauce que directamente sobre él. En las canteras de río, los materiales granulares que se encuentran son muy competentes en obras civiles, debido a que el continuo paso y transporte del agua desgasta los materiales y al final quedan aquellos que tienen mayor dureza y, además, con características geométricas típicas, como sus aristas redondeadas. Estos materiales son extraídos con palas mecánicas y cargadores de las riberas y cauces de los ríos.

**Cartucho de explosivo.** 1. Explosivo de dimensiones específicas y debidamente forrado con papel especial. 2. Carga cilíndrica de explosivos (indugel, fexagel y otros).

**Chimenea.** 1. Una entrada vertical a una mina hecha hacia abajo desde la superficie. 2. Excavación vertical o inclinada que desemboca directamente en la superficie y está destinada a la extracción del mineral, al descenso y al ascenso del mineral y los materiales. En la chimenea van canalizados los cables eléctricos, las tuberías de conducción de agua y aire comprimido; a través de esta se efectúa la ventilación de todas las labores subterráneas.

**Cianuración.** Método para extraer oro o plata a partir de un mineral triturado o molido, mediante disolución en una solución de cianuro de sodio o potasio.

**Cianuro de sodio.** Compuesto químico ampliamente usado en las plantas de tratamiento de minerales de oro para disolver oro y plata.

**Ciclo geoquímico.** Ocurrencia de cambios geológicos que se dividen en dos etapas: ciclo mayor, que comprende todos los procesos involucrados en la formación de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas); ciclo menor, asociado a la formación de suelos a partir de las rocas preexistentes. Ambas etapas se reintegran en diferentes momentos de la cadena para dar nuevamente inicio al proceso o ciclo geoquímico.

**Ciclo minero.** Diferentes fases que ocurren durante el desarrollo de un proyecto minero, definidas en el Plan Nacional de Desarrollo Minero del Ministerio de Minas y Energía, que abarcan desde la gestación de un proyecto hasta su cierre. El ciclo minero tiene las siguientes cinco fases: gestación del proyecto, exploración, desarrollo minero, producción y desmantelamiento.

**Cierre y abandono.** Finalización de la explotación, abandono de montajes y de infraestructura. Se le llama abandono a la fase del ciclo minero durante la cual tiene lugar la disminución gradual de la producción, se lleva a cabo la ejecución del plan de cierre de la mina y del plan de restauración geomorfológica y ambiental del área intervenida. En esta etapa se retiran los equipos e infraestructura. (MME, 2015).

**Cinética. Velocidad de disolución de un analito.** En el caso de la cianuración, se denomina velocidad de disolución de oro. Cantidad de sustancia/tiempo.

**Cizalla.** Deformación resultante del esfuerzo que causa o tiende a causar que partes contiguas de un cuerpo se deslicen relativamente una con otra en una dirección paralela a su plano de contacto. Este es el modo de falla de un cuerpo en el cual la porción de masa sobre un lado de un plano o superficie se desliza y pasa sobre el lado opuesto. Este término también se usa para referirse a superficies y zonas de falla por cizalla, y a superficies a lo largo de las cuales han ocurrido movimientos diferenciales.

**Clasificación (beneficio).** Operación de separación de los componentes de una mezcla de partículas de minerales en dos o más fracciones, de acuerdo con su tamaño, forma y densidad. Cuando se realiza en medio húmedo, la operación también depende de las propiedades del fluido en el que se encuentran las partículas, así como de las características reológicas de la pulpa.

**Clasificación manual.** Selección manual de material en concentrados o preconcentrados antes de ser llevados a la planta de beneficio. La selección puede ser, en el caso de menas de oro, negativa (eliminación de material de ganga) o positiva (selección de granos gruesos de oro); en ambos casos se reduce la carga de material que va a la planta de beneficio.

Código de Minas. Cuerpo de normas que regulan las relaciones entre los organismos y entidades del Estado, y de los particulares entre sí, sobre las actividades de prospección, exploración, explotación, beneficio, transporte, aprovechamiento y comercialización de los recursos no renovables que se encuentren en el suelo o el subsuelo, sean de propiedad de la nación o de privados. Estas normas están contenidas en la Ley 685 del 2001, Código de Minas vigente (Congreso de la República de Colombia, 2001).

**Comercialización.** En minería, compraventa de minerales o de cualquier producto resultante de la actividad minera.

**Compresor.** Máquina para producir aire comprimido, con una presión mayor a la atmosférica, mediante la elevación de la presión del aire al valor de trabajo deseado. El aire comprimido pasa de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías. Se distinguen dos tipos básicos de compresores: el primero trabaja según el principio de desplazamiento; en él la compresión se obtiene por la admisión de aire en un recinto hermético, donde se reduce el volumen del gas, lo que incrementa la presión interna. El segundo tipo es el compresor dinámico, que funcionan por aceleración molecular: el aire se aspira y es acelerado a gran velocidad; la energía cinética del aire se convierte en presión estática. Concentración (beneficio). Operación unitaria en la cual se busca eliminar el material que no es de interés económico con el fin de disminuir el volumen de mineral que debe procesarse. Para esta separación se pueden utilizar propiedades físicas (diferencia de densidad, atracción de campos magnéticos o eléctricos) o físico-químicas de los minerales.

**Concentración gravimétrica.** Método de concentración que aprovecha la diferencia en el peso específico entre los minerales que se quieren separar.

**Concentración mecánica.** Tratamiento del mineral bruto por procedimientos físicos que aumentan su riqueza al eliminar una parte mayor o menor del material estéril. Entre tales procedimientos figuran el lavado, la clasificación, trituración, molienda, dimensionado y pulido de rocas.

**Concentración por medios densos.** Método de concentración que se basa en la diferencia de densidades entre el fluido empleado para la operación y los minerales que interesa separar. Durante el proceso, las partículas más densas que el fluido se hunden, mientras las livianas flotan.

**Concentración residual.** Acumulación de minerales in situ como resultado de procesos de meteorización de las rocas. Las lateritas se producen por este tipo de procesos.

**Concentrado.** Es el producto enriquecido de las operaciones de concentración de minerales.

**Concentrado bulk.** Concentrado que contiene más de un metal con valor comercial.

**Concentrador (industria minera).** 1. Planta donde la mena es separada en material de valor (concentrados) y material de desecho (colas). 2. Se le llama así a un aparato de la planta de concentración, como las celdas de flotación, jigs, electromagnetos, mesa vibratoria, entre otros. 3. Aparato en el que, mediante aire, agua o gravedad, se lleva a cabo la concentración mecánica de una mena.

**Concentrador centrífugo.** Son equipos que utilizan la fuerza centrífuga generada por la rotación a alta velocidad del depósito que se alimenta con el mineral en forma de pulpa. Uno de estos equipos es el concentrador Knelson.

**Concentrados de batea.** Fracción pesada de un sedimento que se obtiene por separación mecánica mediante movimiento circular de la batea para determinar el contenido de minerales metálicos o de alto peso específico.

**Concentrador de espiral.** Concentrador conformado por cinco o seis espirales cerradas en los cuales se efectúa la separación por efecto de la fuerza centrífuga. El funcionamiento de un concentrador de espiral está basado en el principio de concentración a través de un flujo laminar. Este fenómeno se fundamenta en el hecho de que una partícula que se desliza en un canal circular a través de una película de fluido está sujeta, por lo menos, a cuatro fuerzas: fuerza gravitacional, fuerza centrífuga, empuje del líquido y roce contra el fondo del canal.

**Concentrador Knelson.** Concentrador centrífugo que cuenta con un cono invertido, dotado en su interior con una serie de rebordes circulares. La rotación del cono desarrolla fuerzas del hasta sesenta veces la fuerza de la gravedad. Al alimentarlo con la pulpa se establece un lecho o zona de concentración donde las partículas más pesadas quedan atrapadas en el lecho. A través de unas perforaciones existentes en la pared del cono se inyecta agua para evitar la compactación del lecho y crear cierta fluidez que permita concentrar las partículas de mayor densidad. Los equipos más grandes de este tipo pueden tratar hasta noventa toneladas métricas por día.

**Concordancia.** Relación geométrica entre dos unidades estratigráficas superpuestas en las que existe paralelismo entre los materiales infra y suprayacentes.

**Construcción y desarrollo.** Comprende el conjunto de actividades que permiten el acceso al yacimiento y el establecimiento de la infraestructura para el proyecto. Incluye la adquisición de permisos para iniciar la explotación, el diseño y el planeamiento detallado de la explotación, además de trabajos previos que se realizan para llegar a la mina: vías de acceso, instalaciones, servicios sanitarios, instalaciones eléctricas y de agua, campamentos, montajes mineros y de beneficio.

**Construcción y montaje.** Consiste en la preparación de los frentes mineros y en la instalación de obras, servicios, equipos y maquinaria fija necesarios para iniciar y adelantar la extracción o la captación de los minerales, su acopio, su transporte interno y su beneficio.

**Contaminación ambiental.** Acción que resulta de la introducción por el hombre, directa o indirectamente, en el medio ambiente, de contaminantes que, tanto por su concentración, al superar los niveles máximos permisibles establecidos, como por el tiempo de permanencia, hacen que el medio receptor adquiera características diferentes de las originales, perjudiciales o nocivas para la naturaleza, la salud y la propiedad.

**Contrato de concesión.** Son contratos administrativos celebrados entre el Estado (Ministerio de Minas y Energía, como representante de la Nación) y un particular (persona natural o jurídica) para efectuar, por cuenta y riesgo de este, los estudios, trabajos y obras de exploración de minerales de propiedad estatal que puedan encontrarse en una zona determinada, y para explotarlos en los términos y condiciones establecidos en la legislación vigente en el momento de su celebración. Comprende como parte de su objeto las fases de exploración técnica, explotación económica, beneficio de los minerales y cierre o abandono de los trabajos, y obras correspondientes.

**Control de aguas o desagüe (industria minera).** En minería, acciones y obras para la evacuación de aguas de desecho, como sistemas técnicos para la evacuación de aguas en forma de cunetas y estaciones de bombeo, entre otros.

**Costo (finanzas).** 1. En un sentido amplio, es la medida de lo que se debe dar o sacrificar para obtener o producir algo. 2. Es un gasto, una erogación o desembolso en dinero o especie, acciones de capital o servicios, hecho a cambio de recibir un activo. El efecto tributario del término costo (o gasto) es el de disminuir los ingresos para obtener la renta. 3. La transformación o la destrucción de valor en el transcurso de actividades onerosas destinadas a la producción de bienes o utilidad.

**Costo ambiental.** Son los gastos necesarios para la protección, la conservación, el mejoramiento y la rehabilitación del medio ambiente. Es el valor económico que se les asigna a los efectos negativos de una actividad productiva para la sociedad.

**Costo de conversión.** Equivale a los recursos invertidos en procesar el mineral de una etapa a otra del beneficio.

**Costo de inversión.** Costo equivalente a los intereses correspondientes al capital invertido en una maquinaria, equipo o en cualquier actividad que conduzca a una mejora en la producción.

**Costo de operación.** Es el total que se deriva de las erogaciones que hace el contratista por concepto del pago de salarios al personal y de todos los otros gastos relacionados con el desarrollo de la operación.

**Costo por depreciación.** Es el que resulta de la disminución del valor original de la maquinaria.

**Costo por mantenimiento.** Costos originados por todas las erogaciones necesarias para conservar la maquinaria en buenas condiciones, a efectos de que trabaje con rendimiento normal durante su vida económica. Se divide en mayor y menor: en el mantenimiento mayor se consideran todas las erogaciones necesarias para efectuar reparaciones a la maquinaria en talleres especializados, o aquellas que deban realizarse en el campo, con personal especializado, y que requieran retirar la maquinaria de los frentes de trabajo por un tiempo considerable; incluye mano de obra, repuestos y renovación de partes de la maquinaria, así como otros materiales necesarios. En el mantenimiento menor se consideran todas las erogaciones necesarias para efectuar los ajustes rutinarios, reparaciones y cambios de repuestos que se efectúan en las propias obras, así como cambios de líquidos hidráulicos, aceites de transmisión, filtros, grasas y estopas. Incluye el personal y el equipo auxiliar que realizan estas operaciones de mantenimiento, los repuestos y otros materiales que sean necesarios.

**Crédito.** Transacción que implica una transferencia de dinero con el compromiso de que será reembolsado transcurrido un determinado tiempo. Generalmente incluye el pago de una remuneración en forma de intereses. Quien transfiere el dinero se convierte en acreedor, y el que lo recibe, en deudor.

**Cristalización.** Formación de porciones de materia con estructura cristalina, y en ciertos casos, con formas poliédricas, a partir de una solución o de un líquido, gas o sólido amorfo. Cuando un metal líquido se solidifica, los átomos asumen una posición definitiva en la red cristalina. La fatiga o falla de los metales debido a esfuerzos repetitivos, algunas veces es erradamente atribuida a la cristalización.

**Cruzada.** Son labores horizontales, perpendiculares al rumbo del cuerpo mineralizado.

---

## Dd

---

**Dato.** Hecho verificable sobre la realidad; un dato puede ser una medida, una ecuación o cualquier tipo de información que pueda ser verificada (en caso contrario se trataría de una creencia).

**Demanda.** 1. Precio en dinero al que el mercado está dispuesto a comprar. 2. Es la manifestación de la voluntad de comprar un número de unidades de un título valor a un precio dado en el mercado de valores, expresada por un comisionista según órdenes recibidas de algún cliente.

**Depósito mineral.** Concentración natural de sustancias minerales útiles, que bajo circunstancias favorables puede ser extraída con beneficio económico.

**Derecho a explotar.** Es el derecho que tiene el beneficiario de un título minero para realizar un conjunto de operaciones que tienen por objeto la extracción o la captación de los minerales yacentes en el suelo o el subsuelo dentro de un área determinada.

**Derrumbe.** 1. Hundimiento de un tajo o un corte (cámara). 2. Colapso de labores mineras.

**Desabombar.** Actividad que consiste en detectar y forzar la caída, controlada, de fragmentos de roca relativamente grandes, o “planchones” o “petacas” (fragmentos de roca) que se encuentren fracturados y ligeramente desprendidos del techo o los costados de una galería o labor minera subterránea, y que podrían caer de improviso. Esta actividad es obligatoria y periódica en las zonas agrietadas.

**Desanche.** Método de retirar mineral para formar una cavidad o una cámara subterránea en un depósito de filones estrechos. Primero es volada la roca de respaldo a un lado del filón, y después, el mineral.

**Desarrollo (minería subterránea).** El desarrollo es una etapa intermedia entre la exploración y la extracción propiamente dicha, y comprende las labores mineras encaminadas a crear los accesos y vías internas dentro del depósito, con el fin de preparar la extracción y el transporte del mineral. El desarrollo puede ser productivo o improductivo. Este último, en minería subterránea, ocurre cuando el avance se realiza en estéril (cruzadas). En cambio, es productivo cuando el avance horizontal se realiza con extracción de mineral (construcción de guías). (MME, 2015).

**Desarrollo sostenible.** 1. Desarrollo que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida, a la productividad de las personas y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades, es decir, fundado en medidas apropiadas para la preservación de la integridad de los ecosistemas, la protección del ambiente y el aprovechamiento de los elementos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras. 2. Es el mejoramiento de la calidad de vida humana ajustada a la capacidad de carga de los ecosistemas; implica la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la satisfacción de las necesidades de las futuras generaciones.

**Detonador eléctrico.** Fulminantes elaborados de tal manera que pueden hacerse detonar cuando una corriente eléctrica pasa por los hilos de conexión.

**Detrítico.** Materiales sedimentarios conformados por fragmentos de rocas preexistentes.

**Diagrama de operaciones (beneficio) (diagrama de flujo).** Es una representación gráfica de la secuencia de operaciones realizadas durante el procesamiento de un mineral.

**Difracción de rayos X.** Es una técnica instrumental no destructiva que sirve para analizar un amplio rango de materiales, tales como minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, compuestos farmacéuticos, cerámicos y semiconductores, entre otros.

**Dilución.** Material de bajo o nulo tenor de mineral valioso (estéril) que se extrae durante las operaciones mineras y por lo tanto forma parte de las reservas.

**Dique.** Cuerpo tabular de roca ígnea intrusiva, relativamente largo y delgado, que rellena una fisura o una fractura profunda en rocas más antiguas, y las corta discordantemente (corta la estratificación de las capas). Pueden aparecer varios diques dispuestos paralelamente entre sí, y cuando son afectados por erosión pueden dar lugar a relieves descalzados, por ser los materiales del dique más resistentes que los circundantes, o formar una depresión en forma de fosa, en el caso contrario.

**Discordancia.** Es una superficie de erosión entre dos cuerpos de roca, que representa un hiato o espacio significativo en la sucesión estratigráfica.

**Distrito minero.** Porción o área de terreno de un país, generalmente designada con un nombre, cuyos límites han sido descritos y dentro de la cual existen minerales que son extraídos según las reglas y regulaciones establecidas por los mineros locales. No existe límite de extensión territorial para definir un distrito minero, y sus linderos se pueden cambiar, siempre y cuando no se afecten otros derechos.

**Dorsales.** Conocidas también como dorsales meso-oceánicas, son elevaciones submarinas o sistemas montañosos de las cuencas oceánicas, a lo largo de las cuales se producen episodios de rifting, que implican formación de corteza oceánica nueva, a medida que el magma fluye en forma ascendente y se solidifica. Las dorsales están relacionadas con procesos de tectónica de placas del tipo divergente, que implica que el fondo oceánico (corteza oceánica) vaya creciendo y se expanda.

---

## Ee

---

**Empresa.** Unidad institucional o combinación más pequeña de unidades productivas institucionales que abarca y controla, directa o indirectamente, todas las funciones necesarias para realizar sus actividades de producción. Depende de una sola entidad propietaria o de control; puede, sin embargo, ser heterogénea en cuanto a su actividad económica, así como a su emplazamiento. En Colombia, corresponde a la persona jurídica.

**Endógeno.** Todos aquellos procesos geológicos que se generan en el interior de la Tierra, como, por ejemplo, metamorfismo, cristalización magmática y segregación magmática.

**Erosión.** 1. Fenómeno de descomposición y desintegración de materiales de la corteza terrestre por acciones mecánicas o químicas. 2. Pérdida física de suelo transportado por el agua o por el viento, causada principalmente por deforestación, el laboreo del suelo en zonas no adecuadas, en momentos no oportunos, con las herramientas impropias o utilizadas en exceso, especialmente en zonas de ladera, con impactos adversos tan importantes sobre el recurso como la pérdida de la capa o del horizonte superficial con sus contenidos y calidades de materiales orgánicos, fuente de nutrientes y cementantes que mantienen una buena estructura y, por tanto, un buen paso del agua y el aire. En la minería, la erosión hídrica es la más grave, y puede ser laminar, en regueros o surcos y en barrancos o cárcavas. 3. Conjunto de procesos externos (exógenos) que mediante acciones físicas y químicas (como agua, hielo o viento) transforman las formas creadas por los procesos endógenos.

**Escala de minería.** Escala de clasificación que toma como base fundamental el volumen o el tonelaje de materiales útiles y estériles extraídos de una mina durante un determinado período de tiempo. De la capacidad instalada de extracción de materiales dependen las inversiones, el valor de la producción, el empleo, el grado de mecanización de la mina y demás aspectos de orden técnico, económico y social. Los rangos de producción dependen del mineral o material que se explote.

**Escala de valores del oro.** Escala utilizada para medir la pureza del oro, cuya unidad es el quilate. Cubre un rango de uno a veinticuatro quilates, y el oro de mayor pureza es calificado con veinticuatro quilates. Si una pieza tiene doce quilates, quiere decir que la aleación con la que está fabricada tiene 50% de oro.

**Espesor.** Ancho o grosor de una veta, estrato u otra masa mineral, medido perpendicularmente o en la misma dirección del buzamiento y el rumbo. El espesor real es siempre el ancho de la veta, estrato u otro, en su punto más delgado. El espesor real de una veta muestreada puede hallarse según la fórmula  $e = h \times \text{sen } \alpha$ , donde  $h$  = espesor horizontal,  $e$  = espesor real, y  $\alpha$  = ángulo de buzamiento. En esta fórmula, el ángulo “ $\alpha$ ” se sabe por mediciones previas, y el ancho horizontal puede medirse con un nivel. Es importante que el ancho horizontal sea medido en ángulo recto con respecto al rumbo.

**Estéril.** 1. Se dice de la roca o del material de vena que prácticamente no contiene minerales de valor recuperables, que acompañan a los minerales de valor y que es necesario remover durante la operación minera para extraer el mineral útil.

**Estratificación.** 1. Estructuración o arreglo en capas de una roca determinada. 2. Proceso de arreglo de las rocas sedimentarias, originado por algún cambio en la naturaleza de los materiales que están siendo depositados o en las condiciones del ambiente de sedimentación.

**Estudio de factibilidad.** Comprende toda la información con la que se realiza la evaluación de un proyecto, que habilita para tomar la decisión definitiva sobre la realización o sobre el proyecto mismo. El estudio de factibilidad debe suministrar una base técnica económica y comercial para tomar la decisión sobre inversiones que vayan a realizarse en un proyecto minero industrial, lo mismo que sobre sus condiciones operativas y procedimientos asociados.

**Estudio de factibilidad minera.** Estudio en el cual se recopila la información geológico-minera obtenida desde el reconocimiento hasta la exploración detallada: se modela el yacimiento, se diseña la explotación, se determina el volumen de reservas recuperables y se evalúan la calidad técnica y la viabilidad económica del proyecto de explotación minera. Este estudio permite verificar todas las informaciones geológicas, técnicas, ambientales, jurídicas y económicas relativas al proyecto; conduce a la toma de decisiones en materia de inversiones y constituye un documento que los bancos aceptan para las gestiones de financiación de un proyecto.

**Estudio de impacto ambiental (EIA).** 1. Documento técnico que debe presentar el titular del proyecto del cual se efectuará la declaración de impacto ambiental, que es recopilado antes de iniciar un proyecto; este estudio examina los efectos que tendrán las actividades del proyecto sobre las áreas naturales circundantes de un terreno. 2. Instrumento de planificación ambiental para la toma de decisiones con respecto al desarrollo de acciones o proyectos, exigido por la autoridad ambiental, de carácter preventivo, cuyo propósito es identificar, valorar y definir las medidas de preservación, mitigación, control, corrección y compensación de los impactos o consecuencias, y efectos ambientales que las acciones de un proyecto, obra o actividad

pueden causar sobre la calidad de vida del hombre y su entorno. El contenido del EIA incluye: a) resumen del EIA; b) descripción del proyecto; c) descripción de los procesos y las operaciones; d) delimitación, caracterización y diagnóstico de las condiciones ambientales de las áreas de influencia; e) estimación y evaluación de impactos ambientales, y f) plan de manejo ambiental para prevenir, mitigar, corregir y compensar posibles impactos. Debe incluir plan de seguimiento y monitoreo, y plan de contingencia.

**Estudio de prefactibilidad.** Es una evaluación preliminar de la idea de un proyecto. Es la definición de un plan sobre el cual trabajar, con cálculo de los costos, basado en datos físicos y experimentales limitados. En términos generales, este tipo de estudio consiste en realizar una evaluación más profunda de las alternativas encontradas viables y en determinar la bondad de ellas. Su principal finalidad es apoyar la decisión sobre la viabilidad o inviabilidad del proyecto, o determinar la necesidad de análisis más detallados.

**Estudios geológicos.** Recopilación de información geológica de un área o una región, con el objetivo primordial de desarrollar minería, exploración minera u obras civiles, entre otras acciones. Un estudio geológico provee información sobre litología, estructuras y presencia de minerales, entre otros aspectos. Estos estudios pueden ser generales o detallados; por ejemplo, en el caso de túneles para obras civiles, un estudio geológico suministra información metro a metro de la zona que se va a perforar, con detalles de la estructura, la permeabilidad, los niveles freáticos, la dureza de las distintas unidades rocosas y otros aspectos necesarios para determinar la solución a los problemas que se van a encontrar antes de que la perforación alcance las zonas donde existan estos posibles problemas, para de esta manera ahorrar tiempo y dinero e incluso salvar vidas humanas.

**Evaluación del proyecto.** Se basa en el estudio de factibilidad del proyecto, en la evaluación económica (costos, inversiones) y en el análisis de reservas. Además, se realizan los trámites legales, sociales, mineros y ambientales, así como el planeamiento minero.

**Excavación.** 1. Proceso de remoción de material de suelo o roca de un lugar para transportarlo a otro. La excavación incluye operaciones de profundización, voladura, ruptura, cargue y transporte, tanto en superficie como bajo tierra. 2. Pozo, fosa, hoyo o cualquier corte resultante de una excavación.

**Exploración.** Consiste en lograr un conocimiento detallado del depósito mineral descubierto en la etapa de prospección. Para ello se realiza un modelo geológico y de recursos del yacimiento y se adelanta el estudio de prefactibilidad para determinar si vale la pena continuar o no con el proyecto.

**Explosiones de polvo de sulfuro.** En las minas subterráneas, es el riesgo de combustión espontánea de polvo que contiene sulfuros minerales y es transportado por el aire.

**Explosivo.** Los explosivos son sustancias que tienen poca estabilidad química y que son capaces de transformarse violentamente en gases. Esta transformación puede realizarse a causa de una combustión o por acción de un golpe, impacto, fricción u otra causa, en cuyo caso dichas sustancias reciben el nombre de explosivos detonantes, como es el caso de las dinamitas y los nitratos de amonio.

**Explotación (industria minera).** 1. Proceso de extracción y procesamiento de los minerales, así como la actividad orientada a la preparación y el desarrollo de las áreas que abarca el depósito mineral. 2. Es la aplicación de un conjunto de técnicas y normas geológico-mineras y ambientales para extraer un mineral o depósito de carácter económico, para su transformación y comercialización. 3. El artículo 95 de la Ley 685 de 2001 (Código de Minas) define la explotación como “el conjunto de operaciones que tienen por objeto la extracción o captación de los minerales yacientes en el suelo o subsuelo del área de la concesión, su acopio, su beneficio y el cierre y abandono de los montajes y de la infraestructura”.

**Explotaciones pequeñas.** Se consideran explotaciones pequeñas y de poca profundidad las que se realizan con herramientas e implementos simples de uso manual, accionados por la fuerza humana, y cuya cantidad extraída no sobrepasa las 250 toneladas anuales de material.

**Explotaciones tradicionales.** Las explotaciones tradicionales son aquellas áreas en las cuales hay yacimientos de minerales explotados tradicionalmente por numerosas personas vecinas del lugar y que, por sus características y ubicación socioeconómica, son la única fuente de abastecimiento regional de los minerales extraídos.

**Exógeno.** Son todos los procesos geológicos superficiales, como, por ejemplo, la meteorización.

**Extraíble (mineral de interés o valioso).** Parte económica o subeconómica del yacimiento que puede ser extraída durante la operación normal de la mina.

---

## Ff

---

**Factibilidad.** es un estudio técnico y económico exhaustivo de la opción de desarrollo seleccionada para un proyecto minero, que incluye evaluaciones apropiadamente detalladas de los factores modificadores aplicables, junto con cualquier otro factor operacional relevante y los análisis financieros detallados que son necesarios para demostrar, al momento de presentar el reporte que la extracción está razonable justificada (económicamente explotable). Los resultados de estudio pueden razonablemente servir como base para la decisión final para que el titular o institución bancaria, proceda al financiamientos o desarrollo del proyecto.”

**Filón.** Relleno de minerales que ha colmado una fisura en la corteza terrestre.

**Fluidos hidrotermales.** Son fluidos que pueden contener agua a alta temperatura, y son volátiles y químicamente activos. Su origen puede ser magmático o de aguas meteóricas que se calientan y ascienden. Los fluidos hidrotermales pueden transportar y depositar metales, lo cual produce alteraciones químicas en las rocas con las cuales interactúan.

**Flujo de caja (cash flow).** Refleja los cobros y pagos del negocio o empresa en un periodo determinado. No incluye partidas de la cuenta de resultados que no corresponden a movimientos de caja, como, por ejemplo, amortizaciones y provisiones.

**Fundición.** Proceso pirometalúrgico mediante el cual un metal es llevado del estado sólido al líquido.

---

## Gg

---

**Galerías.** Túneles horizontales en el interior de una mina subterránea.

**Ganga.** 1. Minerales que no presentan interés económico en un yacimiento; aquella parte de una mena que no es económicamente deseable, pero que no puede ser desechada en minería. Es separada de los minerales de mena durante los procesos de concentración. Este concepto se opone al de mena. Es el material estéril o inútil que acompaña al mineral que se explota. Generalmente son minerales no metálicos, o bien la roca encajante, y muy ocasionalmente pueden ser minerales metálicos. Los minerales de ganga son aquellos que no son beneficiables, pero en algunos casos pueden llegar a ser económicamente explotables (al conocerse alguna aplicación nueva para estos), en cuyo caso dejarían de ser ganga; por ejemplo, el mineral de ganga es galena. 2. La roca de derroche que rodea un depósito de mineral; también la materia de menor concentración en un mineral.

**Gas (industria minera).** 1. Término usado por los mineros para referirse a un aire impuro, especialmente con combinaciones explosivas. 2. Gases combustibles (metano), mezcla de aire y gases combustibles, u otras mezclas de gases explosivos que se encuentran en las minas.

**Gases esenciales.** En minería, el aire atmosférico y el oxígeno, los gases indispensables para la vida del hombre.

**Gases explosivos.** En minería, gases que en altas concentraciones forman mezclas explosivas con el aire: metano (CH<sub>4</sub>); monóxido de carbono (CO, explosivo en concentraciones entre 13 y 75%) y C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.

**Gases nitrosos (NO y NO<sub>2</sub>).** Son derivados de diferentes óxidos de nitrógeno. Se encuentran como mezcla en diferentes concentraciones como productos habituales en las voladuras practicadas en los frentes. Estos dos gases no se separan nunca en esta situación, por lo que hay que reconocerlos juntos, aunque los porcentajes varíen constantemente. Producen la muerte por edema pulmonar, por lo que es preciso tener cui-

dado en los momentos inmediatos a la pega, y conviene regar la carga de tierra para disolverlos. Se detectan mediante tubos colorimétricos. Su característica más destacada es su olor acre.

**Gases sofocantes.** En minería, gases que producen ahogo, y en altas concentraciones pueden producir la muerte: nitrógeno (N<sub>2</sub>); dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que cuando es mayor que 15% en volumen, es mortal; metano (CH<sub>4</sub>) y el gas de carburo (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), producido por la acción del agua sobre el carburo de calcio, que produce un característico olor a ajo.

**Gases tóxicos.** En minería, gases nocivos al organismo por su acción venenosa: monóxido de carbono (CO); humos nitrosos (de olor y sabor ácidos); sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico) (H<sub>2</sub>S) (su límite permisible es de 8 pm), que tiene olor a huevos podridos, y anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>), que en concentraciones mayores del 15% en volumen, es mortal (su límite permisible es de 1,6 pm).

**Geólogo.** Profesional que tiene conocimientos sobre la composición, la estructura y la evolución de la Tierra; conoce la distribución de las rocas en el espacio y en el tiempo. Esta distribución de las rocas y los minerales permite al geólogo encontrar yacimientos de minerales, petróleo y gas. Además, esta disposición permite conocer la geología, requisito para asentar edificios, puentes y carreteras sin riesgo para la vida humana.

**Geoquímica.** 1. Estudia la distribución, la dispersión en la naturaleza (ciclos) y la concentración de elementos químicos en minerales, cuerpos mineralizados, rocas, suelos, aguas y atmósfera, y toma como base las propiedades de sus iones y átomos. 2. Estudio espacial y temporal de los elementos químicos y sus especies, y de los procesos físico-químicos que controlan su movilidad, su transformación y su acumulación en el medio ambiente. 3. Estudio de los elementos químicos y de los procesos en los cuales intervienen, en el interior y sobre la superficie terrestre.

**Geoquímica de minerales.** Geoquímica de los metales principales y trazas componentes de los minerales.

**Grava (rocas sedimentarias).** Material redondeado producto de la desintegración, natural o artificial, de cualquier tipo de roca, especialmente de aquellas ricas en cuarzo, cuyo diámetro es superior a 2 mm.

**Grisú.** Mezcla de metano con aire en proporciones variables, que puede contener algún que otro gas (como etano y anhídrido carbónico, entre otros), si bien es el metano, que puede alcanzar porcentajes muy altos, el que determina sus características. Estas características son: altamente combustible y arde con llama azulada; es incoloro, insípido, asfixiante y pesa menos que el aire. Puede desplazar al oxígeno en la mezcla de aire hasta niveles en los que el porcentaje de oxígeno (O<sub>2</sub>) sea lo suficientemente bajo para no permitir la supervivencia humana, y tiende a acumularse en los lugares altos de las labores, donde la velocidad de ventilación es insuficiente.

**Guía (industria minera).** Es una galería subterránea que sigue el rumbo del cuerpo mineralizado (vena, veta, filón, manto o capa). Las guías no tienen salida directa a la superficie y están destinadas al transporte de cargas, circulación de personal, ventilación, desagüe, y conducen a los frentes de trabajo.

---

## Hh

---

**Horizonte de evaluación del proyecto.** Tiempo definido para medir la bondad financiera del proyecto.

---

## Ii

---

**Impacto ambiental.** 1. Alteración o cambio neto parcial, positivo o negativo (adverso o benéfico), en el medio ambiente o en alguno de sus componentes, resultante de actividades, productos o servicios de una organización. Un impacto ambiental conduce a un problema ambiental. La intensidad de la alteración está relacionada con la capacidad de acogida del territorio donde se desarrolla la actividad impactante. 2. Efecto que las actuaciones humanas producen en el medio ambiente.

**Impuesto.** Pago obligatorio de dinero que exige el Estado a los individuos o empresas que no están sujetos

a contraprestación directa, con el fin de financiar los gastos propios de la administración del Estado y la provisión de bienes y servicios de carácter público, tales como administración de justicia, gastos de defensa, subsidios y muchos otros. Solo por ley pueden establecerse los impuestos, de cualquier naturaleza que sean, señalarse sus modalidades, su repartición o su supresión. Las dos categorías fundamentales son los impuestos directos e indirectos.

**Impuesto sobre la renta.** Contribución que grava el ingreso de las personas y entidades económicas. El impuesto sobre la renta incluye el gravamen al trabajo, al capital y la combinación de ambos. Es un impuesto directo, porque incide en forma específica sobre el ingreso de las personas y de las sociedades mercantiles. En Colombia, la tasa del impuesto a la renta es del 33%, y se paga anualmente.

**Información.** Acción y efecto de adquirir conocimiento o formación mediante el aprendizaje y el entendimiento. La información es un proceso por el cual, del conjunto de datos accesibles, se extrae y elabora aquel subconjunto que tiene relevancia para el sujeto que se informa.

**Infraestructura minera.** Conjunto de bienes, instalaciones y servicios establecidos (agua, pozos sépticos, acueducto, energía, entre otros), básicos para el normal desarrollo de una operación minera. La infraestructura minera, como un todo, constituye un gran sistema compuesto por subsistemas, que deben considerarse desde diferentes puntos de vista y no exclusivamente desde el económico. Un subsistema importante es, por ejemplo, el transporte, que está compuesto por caminos, carreteras, vías férreas, aeropuertos, puertos, entre otros, e incluye vehículos, instalaciones y otros muchos bienes más y, desde luego, organizaciones que incluyen a las personas que las manejan.

**Ingresos.** Entrada de dinero a una empresa, derivada de la venta de sus productos, servicios, operaciones financieras y otros rubros.

**Interés.** Compensación que se debe dar a un sujeto económico por su disposición a desprenderse de dinero, que se formaliza a través de las operaciones de crédito o de préstamo.

**Inversión.** Bienes comprados por las personas o las empresas para aumentar su stock de capital.

**Inversión en bienes de equipo.** Equipos y estructuras que compran las empresas para utilizarlos en la producción futura.

**Inversionista.** Es quien coloca su dinero en un título valor o alguna alternativa que le genere un rendimiento futuro, ya sea una persona o una sociedad.

**Inclusiones fluidas.** Son fluidos que se encuentran atrapados dentro de un mineral con estructura cristalina. Se encuentran en cristales que se forman a partir de fluidos (por ejemplo, agua o magma) y no suelen sobrepasar 0,1 mm de diámetro. Según sus orígenes, se pueden distinguir tres tipos de inclusiones fluidas: a) Primarias, que se forman durante el crecimiento del cristal y pueden presentarse aisladas, en pequeños grupos de inclusiones fluidas sin orientación particular, o alineadas paralelamente a las zonas de crecimiento del cristal. b) Secundarias, que se forman en fracturas en cristales, que han sido penetradas por fluidos para luego sellarse mediante la autorreparación del cristal; se presentan como lineamientos de inclusiones que llegan a tocar la superficie del cristal, e incluso, a veces, pueden continuar en cristales aledaños. c) Seudosecundarias: se trata de inclusiones que por sus lineamientos parecen secundarias, aunque en realidad son primarias; se las considera un subgrupo de las inclusiones primarias. De las inclusiones fluidas se puede obtener información como la temperatura y la presión a la cual se formó el mineral, qué contenedor, además del tipo fluido del cual se formó, y la densidad de tal fluido.

---

## Ll

---

**Licencia ambiental.** 1. Es la autorización que otorga la autoridad competente a una persona natural o jurídica para que adelante la ejecución de un proyecto, obra o actividad. En ella se establecen los requisitos, las obligaciones y las condiciones que el beneficiario debe cumplir para prevenir, mitigar o corregir los efectos indeseables que el proyecto, obra o actividad autorizada puede causar en el ambiente. 2. Autorización que

otorga la autoridad competente para la construcción, el montaje, la explotación objeto del contrato y el beneficio, y para las labores adicionales de exploración durante la etapa de explotación. Se otorga de manera global y comprende, además, los permisos, autorizaciones y concesiones de carácter ambiental para hacer uso de los recursos necesarios en el proyecto minero.

**Litificación.** Proceso mediante el cual un material se convierte en roca compacta en la corteza terrestre.

**Lixiviable.** Material extraíble o tratable mediante técnicas de lixiviación.

**Lixiviación (beneficio).** Proceso hidro-metalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo químico apropiado.

**Lixiviación (geoquímica).** 1. Remoción de elementos químicos desde un material natural (por ejemplo, suelo), mediante su disolución en agua y su transporte o movilización descendente a través de un terreno o medio sólido poroso. 2. Proceso natural mediante el cual, por acción del agua, se liberan y transportan elementos a través de un perfil (suelo) hacia los horizontes inferiores.

**Lixiviación a presión.** Disolución selectiva de un mineral en medio acuoso ácido o básico, mediante la aplicación de altas presiones y temperaturas. El proceso se realiza en equipos denominados autoclaves.

**Lixiviación biológica.** 1. Proceso de recuperación de metales de minerales de bajo tenor que se basa en liberar una solución de los metales con la utilización de bacterias. 2. Es el proceso de usar bacterias que se presentan naturalmente para acelerar la oxidación de minerales sulfídicos que contienen algunas formas de oro y, a la vez, previenen que los químicos lixiviantes alcancen el oro. Cuando la mena es expuesta a grandes concentraciones de estos organismos que consumen sulfuros, se pueden remover cantidades suficientes de material sulfídico para luego recuperar el oro mediante procesos normales de lixiviación.

**Lixiviación por percolación.** Proceso de lixiviación en el cual la solución lixiviante y las aguas de lavado pueden circular por efecto de la gravedad a través de las partículas de mineral en el interior de un tanque o en el suelo, y disolver el metal de interés. Generalmente, las partículas del mineral apto para este proceso deben tener un tamaño entre 6 y 9 mm.

**Lixiviados.** Solución obtenida por extracción o lixiviación; tal es el caso de la solución resultante de la percolación descendente de agua meteórica a través del suelo o de desechos sólidos que contienen sustancias solubles (por ejemplo, en un relleno sanitario).

---

## Mm

---

**Manejo de aguas (industria minera).** Proceso en el que, en un área minera, se produce un descenso de la tabla de agua subterránea mediante bombeo de pozos para luego ser transportada y utilizada o recargada en el sistema de aguas subterráneas mediante infiltración, reinyección o irrigación.

**Medio ambiente.** Conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas que rodean a un organismo.

**Mena.** 1. Mineral de base del que es posible extraer otro mineral de mayor pureza e importancia económica. La molibdenita (sulfuro de molibdeno), por ejemplo, es la principal mena del molibdeno. 2. Minerales que presentan interés económico en un yacimiento; este concepto se opone al de ganga. En general, es un término que se refiere a minerales metálicos y que designa al mineral del que se extrae el elemento de interés. Para aprovechar mejor la mena suele ser necesario su tratamiento, que por lo regular comprende dos etapas: el tratamiento en el sitio de mina para aumentar la concentración del mineral en cuestión (procesos hidrometalúrgicos y flotación, entre otros), y el tratamiento metalúrgico final, que permite extraer el elemento químico en cuestión (tostación y electrólisis, entre otros).

**Metalogénesis.** Proceso que permite definir y, dado el caso, mostrar en un mapa, las áreas que pueden contener concentraciones minerales.

**Metalogenia.** Rama de la geología que estudia el origen de los yacimientos minerales, sus relaciones con las rocas que los contienen, las estructuras que los controlan y las leyes que gobiernan la distribución de los depósitos minerales en la corteza terrestre. Esta definición considera todas las variables en el espacio y en el tiempo.

**Metalografía.** Descripción y clasificación de metales mediante el estudio de la estructura de un metal-aleación y la relación con la composición química, y con las propiedades mecánicas y físicas.

**Metalurgia.** 1. Estudio y tecnología de los metales y aleaciones. 2. Es la ciencia de extraer metales de las respectivas menas por medios mecánicos y procesos químicos, y de prepararlos para su uso.

**Metamorfismo.** Proceso por el cual se producen profundas transformaciones mineralógicas, estructurales y químicas en rocas o minerales, debido a bruscas variaciones en las condiciones de presión y temperatura, y que da lugar a la formación de un nuevo tipo de rocas llamadas metamórficas. Esencialmente, es un proceso isoquímico que conduce al estado sólido, con cristalización de nuevos minerales, llamados neoformados, y adquisición de texturas y estructuras particulares diferentes de las de la roca originaria. Cualquier roca, sea ígnea, sedimentaria o metamórfica, puede ser afectada por el metamorfismo. Hay varios esquemas para distinguir diferentes tipos de metamorfismo: a) según la extensión sobre la cual tuvo lugar el metamorfismo: metamorfismo regional y local; b) según las condiciones (ambiente) geológicas: orogénico, de enterramiento, de fondo oceánico, dinámico, de contacto y dinamotérmico; c) según el principal factor controlante durante el metamorfismo (temperatura [T], presión [P], presión de agua [PH<sub>2</sub>O], esfuerzos, deformaciones): térmico; d) según la causa particular del metamorfismo: de impacto, hidrotermal, por quema de combustibles naturales (raro), por rayos (descargas eléctricas naturales); en esta categoría se puede incluir el metamorfismo de contacto, el pirometamorfismo y el metamorfismo asociado con el emplazamiento de cuerpos tectónicos calientes; e) según si el metamorfismo es el resultado de un único o de múltiples eventos: monometamorfismo, polimetamorfismo: una roca o complejo de rocas pueden presentar los efectos de más de un evento metamórfico (por ejemplo, dos metamorfismos regionales o un metamorfismo de contacto y uno regional), y f) si el metamorfismo está asociado con un incremento o descenso de la temperatura: prógrado, retrógrado.

**Metasomatismo.** 1. Proceso, prácticamente simultáneo, de solución capilar y deposición, por medio del cual un nuevo mineral o agregado de minerales, de composición química parcial o totalmente diferente, se desarrolla en el cuerpo de un antiguo mineral o agregado de minerales. 2. Proceso por el cual un mineral es reemplazado por otro de diferente composición química, debido a un grupo de reacciones que permiten la introducción de material de fuentes externas. 3. Proceso de solución y deposición simultánea que ocurre a través de pequeñas aperturas, generalmente submicroscópicas, y principalmente por acción de soluciones acuosas hipogénicas, que da como resultado un nuevo mineral de composición total o parcialmente diferente, y que puede desarrollarse en el cuerpo de un antiguo mineral o agregado de minerales.

**Metilmercurio.** El metilmercurio (a veces escrito como metil-mercurio) es un catión organometálico de fórmula química [CH<sub>3</sub>Hg]<sup>+</sup>. Se trata de un compuesto neurotóxico capaz de concentrarse en el organismo (bioacumulación) y concentrarse, asimismo, en las cadenas alimentarias (biomagnificación), que ocupa un lugar especial debido a que cierto porcentaje de la población mundial está expuesta a él de una u otra forma, y su toxicidad está mejor caracterizada por la investigación médica que la de otros compuestos orgánicos del mercurio.

**Mineral.** 1. Sustancia homogénea originada por un proceso genético natural, con composición química, estructura cristalina y propiedades físicas constantes dentro de ciertos límites. 2. Minerales que se caracterizan por una estructura cristalina y por una composición química determinadas, que pertenecen a un rango de variaciones continuas y que se encuentran en equilibrio bajo unas condiciones termodinámicas determinadas. 3. El Código de Minas define el mineral como la sustancia cristalina, por lo general inorgánica, con características físicas y químicas propias debido a un agrupamiento atómico específico.

**Mineral asociado.** Categoría en la que se incluyen los minerales que hacen parte integral del cuerpo mineralizado objeto del contrato de concesión. Véase ganga.

**Mineral de alteración.** Mineral que se forma como producto de reacciones físico-químicas de fluidos hidrotermales o de actividad ígneo-volcánica con minerales que componen las rocas encajantes. Se excluyen los

minerales formados por meteorización o intemperismo. Los tipos de alteración hidrotermal más comunes son potásica, skarn, fílica, propílica, argílica, subpropílica, albitización, piritización, carbonatización, ceolitización, alunitización, caolinización, silicificación, dolomitización, turmalinización, epidotización, argílica avanzada, sericítica, cloritización.

**Mineral de mena.** Véase mena.

**Mineralización.** Procesos naturales por los cuales los minerales son introducidos en las rocas. Los procesos de mineralización más conocidos son segregación magmática; diferenciación magmática, hidrotermal; sublimación; metasomatismo de contacto; metamorfismo; sedimentación; evaporación; concentración residual; oxidación y enriquecimiento supergénico; concentración mecánica, y eólico.

**Mineralogía.** Ciencia que estudia los minerales: la manera en que se combinan, cristalizan, presentan y distribuyen estos compuestos, sus diversas características físicas y químicas, su origen y su distribución en la corteza terrestre. Está ligada a la geología (que estudia los procesos físicos que determinaron la formación de la Tierra).

**Minería.** Ciencia, técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento, la exploración y la explotación de yacimientos minerales. Estrictamente hablando, el término se relaciona con los trabajos subterráneos y a cielo abierto (en superficie) encaminados al arranque y al tratamiento de una mena o la roca asociada. La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad, y consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales que se encuentran en la corteza terrestre.

**Minería de subsistencia.** Es la actividad minera desarrollada por personas naturales o grupo de personas que se dedican a la extracción y recolección a cielo abierto de arenas y gravas de río destinadas a la industria de la construcción, arcillas, metales preciosos, piedras preciosas y semipreciosas por medios y con herramientas manuales, sin la utilización de ningún tipo de equipo mecanizado o maquinaria para su arranque. Incluye las técnicas de barequeo (véase) y de recolección de minerales. No comprende las actividades que se desarrollan en espacios subterráneos sin título minero (Ministerio de Minas y Energía, Decreto 1666 de 2016).

**Minería formal.** Actividad cuyas unidades productivas desarrollan las labores mineras con título minero vigente o bajo el amparo de este, y con instrumento ambiental, y cumplen con los parámetros técnicos, ambientales, económicos, laborales y sociales de la industria, definidos por la legislación vigente en estos aspectos.

**Minería ilegal.** Es la minería que se desarrolla sin estar inscrita en el Registro Minero Nacional y, por lo tanto, sin título minero. Es la minería desarrollada de manera artesanal e informal, al margen de la ley. También incluye trabajos y obras de exploración sin título minero. Incluye minería amparada por un título minero, pero en la que la extracción, o parte de ella, se realiza por fuera del área amparada por la licencia.

**Minería legal.** Es la minería amparada por un título minero, que es el acto administrativo escrito mediante el cual se otorga el derecho a explorar y explotar el suelo y el subsuelo mineros de propiedad nacional, según el Código de Minas. El título minero deberá estar inscrito en el Registro Minero Nacional.

**Minería tradicional.** La minería tradicional es aquella que se ha ejercido desde antes de la vigencia de la Ley 685 de 2001, en un área específica, en forma continua o discontinua, por personas naturales o grupos de personas naturales o asociaciones sin título minero inscrito en el Registro Minero Nacional, en yacimientos minerales de propiedad del Estado y que, por las características socioeconómicas de éstas y la ubicación del yacimiento, constituyen para dichas comunidades la principal fuente de manutención y generación de ingresos, además de considerarse una fuente de abastecimiento regional de los minerales extraídos. Esta minería es también informal y puede ser objeto de procesos de formalización a los que hacen referencia los artículos 31 y 257 de la Ley 685 de 2001, así como los programas de que trata el capítulo XXIV de la Ley 685 de 2001 (Código de Minas). Por lo anterior, se entiende que la minería tradicional es una subespecie de la minería informal.

**Modelo.** Una abstracción de la realidad. Un modelo es estructurado como un conjunto de reglas y procedimientos utilizados para derivar nueva información que puede ser analizada para ayudar a resolver problemas de planeación.

**Molienda.** Operación de reducción de tamaño de un mineral realizada después de la trituración. Puede ser de tipo primario o secundario, según el tamaño requerido del producto.

**Molienda autógena.** Proceso de reducción de tamaño llevado a cabo en un cilindro rotatorio, en el cual el efecto molidor es causado por la fricción mutua entre las partículas de mineral.

**Molienda semiautógena (SAG).** Método de molienda de roca y minerales en el cual el medio molidor está compuesto por trozos grandes del mismo material que se intenta moler, y bolas de acero.

**Molino.** Máquina usada en la molienda de minerales.

**Molino de arrastre.** Molino para minerales que consiste en una o más piedras grandes arrastradas por un lecho circular.

**Molino de barras.** Molino para molienda fina (última etapa de la molienda, en la que el material que se entrega pasa por un tamiz de malla de 1 mm<sup>2</sup> de sección), similar a los molinos de bolas. Es un equipo cilíndrico que tiene en su interior barras de acero que, cuando el molino gira, caen sobre el material.

**Molino de bolas.** Cilindro metálico cuyas paredes están reforzadas con material fabricado con aleaciones de acero al manganeso. Estas molduras van apernadas al casco del molino y se sustituyen cuando se gastan. El molino gira y la molienda se lleva a cabo por efecto de las bolas de acero al cromo o manganeso que, al girar con el molino, son retenidas por las ondulaciones de las molduras a una altura determinada, desde donde caen y pulverizan por efecto del impacto el material mineralizado mezclado con agua.

**Molino de guijarros.** Molino cilíndrico, similar al molino de barras, con solo un compartimento y una carga de partículas de mineral cribadas como medio de molienda. Son muy usados en las minas de oro de Sudáfrica. Se utilizan cuando la proporción de tamaños gruesos es demasiado baja, donde la fracción gruesa de la alimentación se separa y el resto se tritura hasta un tamaño más fino, y se introduce todo en el molino de guijarros para completar la molienda fina.

**Molino tubular.** Aparato que consiste en un cilindro giratorio, lleno aproximadamente hasta la mitad de varillas y bolas de acero, en el cual se introduce la mena triturada para obtener una molienda más fina.

---

## Oo

---

**Oferta.** 1. Precio al cual se ofrece un título para la venta. En la cotización de determinado título el offer constituye el precio más bajo que un vendedor está dispuesto a recibir por dicho título en ese momento dado. 2. Situación por la cual una sociedad hace público su deseo de adquirir una participación mayoritaria en otra.

**Onza troy.** Unidad de masa en la cual son comercializados metales preciosos como el oro y el platino. Una onza troy equivale a 31,103 g.

---

## Pp

---

**Permiso ambiental.** Autorización que concede la autoridad ambiental para el uso o el beneficio temporal de un recurso natural.

**Petrografía (petrología).** Rama de la geología que estudia las rocas desde el punto de vista genético (origen) y su relación con otras rocas.

**Planta de procesamiento de minerales.** Instalación industrial o semiindustrial en la cual un mineral es tratado para la recuperación de los metales o compuestos de interés mediante una secuencia de operaciones o procesos unitarios, que utiliza algún tipo de energía (eléctrica, mecánica, hidráulica o térmica) para la operación de los equipos o máquinas.

**Pre-factibilidad.** es un estudio exhaustivo de un rango de opciones para la viabilidad técnica y económica de un proyecto minero que ha avanzado hasta una etapa en la que se ha establecido un método preferido de extracción y procesamiento de mineral, ya sea en minería subterránea o a cielo abierto, incluye un análisis financiero basado en suposiciones razonables de los factores modificadores.

**Preparación (desarrollo minero).** Labores mineras llevadas a cabo para facilitar la explotación apropiada del yacimiento o depósito, una vez se ha completado la exploración minera y se ha logrado el acceso y el desarrollo tanto en el rumbo como en el buzamiento. Las labores de preparación se realizan, en su mayoría, dentro del yacimiento mismo, e incluyen: a) inclinados y tambores, b) subniveles y sobreguías y c) algunas cruzadas, “chutes” de descargue, algunas clavadas y verticales, y otros trabajos.

**Preparación de minerales.** Es una parte de la metalurgia extractiva que comprende la secuencia de operaciones físicas y mecánicas (trituración, molienda, clasificación, aglomeración, concentración) mediante las cuales se adecúa el mineral para procesos posteriores de extracción sin producir alteración química del alimento.

**Presión de vapor.** Es la presión de la fase gaseosa o vapor de un sólido o un líquido sobre la fase líquida, para una temperatura determinada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico. Su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas.

**Producción (aspectos económicos).** Es la suma del valor de todos los bienes y servicios producidos por los agentes económicos residentes, ofrecidos para diferentes usos, incluido el consumo intermedio.

**Producción (industria minera).** Fase del ciclo minero (véase) que tiene como objetivo la extracción, la preparación o el beneficio, el transporte y la comercialización del mineral. Es la fase de mayor duración, generalmente entre diez y treinta años, y depende del nivel de reservas, el tipo de explotación y las condiciones de la contratación.

**Productividad.** Relación entre lo producido y los medios empleados, tales como mano de obra, materiales, energía y maquinaria, entre otros.

**Producto (industria minera).** Cantidad de mineral obtenido en un proceso o una operación, que puede servir a la vez como alimento para un tratamiento posterior.

**Propiedades físicas.** Son las características que se pueden medir u observar sin alterar la composición de la sustancia, como, por ejemplo, el color, olor, la masa, forma, solubilidad, densidad, punto de fusión, etc.

**Propiedades químicas.** Son aquellas que pueden ser observadas cuando una sustancia sufre un cambio en su composición. Por ejemplo, oxidación.

**Prospección.** Consiste en localizar anomalías geológicas donde pueda existir un depósito mineral.

**Provincia metalogénica.** Región en la que una serie de depósitos minerales tienen características comunes.

**Proyecto de inversión.** Es un plan que contiene un conjunto de actividades coordinadas entre sí para posibilitar el cumplimiento de un propósito específico o la materialización de una idea. En este sentido, los proyectos son un instrumento básico de información para la toma de decisiones de inversión.

**Pruebas de planta piloto.** Pruebas que buscan identificar las mejores condiciones de operación de una planta de beneficio del mineral.

---

## Rr

---

**Recuperación (industria minera).** Relación entre el peso del componente útil en el concentrado de mineral y el del mismo componente en el alimento de la operación unitaria. Por lo general se expresa en porcentaje y, en ocasiones, sirve como indicativo del rendimiento de una operación de preparación de minerales.

**Recursos naturales.** Son elementos de la naturaleza susceptibles de ser utilizados por el hombre para la satisfacción de sus necesidades o intereses económicos, sociales y espirituales. Se dividen en recursos renovables (véase) y recursos no renovables (véase).

**Recursos naturales no renovables.** Son los recursos que no tienen capacidad de recuperarse o regenerarse después de ser aprovechados, aunque posiblemente se regeneren en escalas de tiempo geológico grandes.

**Recursos naturales renovables.** Son aquellos cuya fuente es abundante y se generan a una velocidad tal que pueden ser utilizados repetidas veces por el hombre, sin arriesgar su agotamiento.

**Regalía.** 1. Compensación por el uso de la propiedad ajena basada en un porcentaje acordado de los ingresos resultantes de su uso. Por ejemplo, la que recibe un fabricante por el uso de su maquinaria en la fábrica de otra persona. Regularmente, las regalías se asocian con la actividad extractiva, más especialmente con la actividad petrolera. 2. De conformidad con los artículos 58, 332 y 360 de la Constitución Política, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación obligatoria.

**Relave (o cola).** Conjunto de desechos tóxicos de procesos mineros resultado de la concentración de minerales, por lo general constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga (o sin valor comercial), aunque también se encuentran bajas concentraciones de metales pesados, tales como cobre, plomo y mercurio, y metaloides como el arsénico.

**Reserva mineral:** es la parte económicamente explotable de un recurso mineral medido y/o indicado, esto incluye el material de dilución y pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es explotado o extraído y está definido apropiadamente por estudios de pre factibilidad o factibilidad que incluyen la aplicación de factores modificadores. (minería, procesamientos, metalúrgicos, infraestructura, económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales). Las reservas minerales incluyen reservas probables y probadas.

**Roca encajante (yacimientos minerales).** Unidad o cuerpo de roca que contiene un recurso mineral.

**Rocas metamórficas.** Toda roca que en estado sólido ha sufrido cambios texturales y composicionales (físico-químicos) causados por variaciones de presión y temperatura. Según el grado de metamorfismo, estos cambios pueden ser o no más evidentes.

**Rocas sedimentarias.** Son las que se forman por la acumulación y la compactación de sedimentos, en un proceso llamado litificación. Se presentan estratificadas y pueden contener fósiles.

**Rocas volcánicas, ígneas o magmáticas.** Rocas ígneas que se forman a partir de la consolidación de material del magma que fluyó hacia la superficie terrestre (lava) o fue lanzado violentamente (de forma explosiva) desde un volcán (piroclastos como, por ejemplo, ceniza). Una característica importante de las rocas volcánicas es que tienen una tasa de enfriamiento alta, es decir, el paso desde magma a roca es rápido. Las formas de solidificación de las vulcanitas están estrechamente relacionadas con su contenido en SiO<sub>2</sub>, con el contenido gaseoso de los fundidos respectivos y con la viscosidad de la lava.

---

## Ss

---

**Sector.** Conjunto de empresas o instituciones dedicadas a una misma actividad económica.

**Sedimento.** Material sólido que se asienta desde el líquido cuando se encuentra en suspensión.

**Silicificación.** Introducción de sílice o reemplazo de componentes por sílice. La sílice formada o introducida es generalmente cuarzo de grano fino, calcedonia u ópalo, y puede rellenar poros o reemplazar minerales existentes. El término es aplicable a procesos magmáticos, hidrotermales o diagenéticos.

**Sistema General de Riesgos Profesionales.** Conjunto de normas, entidades y procedimientos destinados

a prevenir, proteger y atender a los trabajadores de los efectos de las enfermedades y los accidentes que puedan ocurrir con ocasión o como consecuencia del trabajo.

**Sostenibilidad.** Es el deber de manejar adecuadamente los recursos naturales renovables, así como garantizar la integridad y el disfrute del ambiente; es compatible y concurrente con la necesidad de fomentar y desarrollar racionalmente el aprovechamiento de los recursos mineros como componentes básicos de la economía nacional y del bienestar social.

**Sulfuros.** Minerales formados a partir del enlace entre el azufre y otro elemento químico, en especial un metal (Zn, Cu, Pb, Hg, Sb, Bi, Ni).

---

## Tt

---

**Tasa de descuento.** Se puede definir como el costo de oportunidad en que se incurre al tomar la decisión de invertir en el proyecto, en lugar de hacerlo en otras alternativas que pueda ofrecer el mercado financiero.

**Tasa interna de retorno (TIR).** Indicador de la rentabilidad de un activo financiero. Es aquella tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de ingresos futuros (intereses, amortizaciones parciales), con el costo de la inversión inicial. Corresponde al rendimiento que obtendría el inversionista de mantener el instrumento hasta su vencimiento, bajo el supuesto de que reinvierte los flujos de ingresos a la misma tasa. En el caso de instrumentos de renta fija, es equivalente al rendimiento a vencimiento.

**Tenor.** Porcentaje neto de mineral económicamente recuperable de una mena.

**Tenor de cabeza.** La ley promedio de la mena alimentada al molino. Esta expresión se refiere al dato de tenor del material que entra a la planta de beneficio, y se calcula tanto para el producto como para los coproductos y subproductos.

**Tenor de colas.** Tenor, ley o concentración de mineral en las colas que se desechan al final del proceso mineralúrgico (beneficio).

**Título minero de exploración.** Es el acto administrativo que confiere a una persona el derecho exclusivo a realizar, dentro de una zona determinada, trabajos dirigidos a establecer la existencia de minerales y sus reservas en calidad y cantidad comercialmente explotables.

**Título minero de explotación.** Es el derecho que tiene el titular de la licencia de exploración que ha sido clasificado en forma definitiva como de pequeña minería para convertir su título en licencia de explotación.

**Tonelada métrica.** Unidad de peso equivalente a 1.000 kg o 2.205 lb.

**Transformación.** Transformación minera 1). Conjunto de operaciones fisicoquímicas o metalúrgicas a que se somete un mineral después de ser beneficiado, para obtener un primer producto comercial utilizable por la industria y el consumidor. 2). De acuerdo con el Código de Minas, es la modificación mecánica o química del mineral extraído y beneficiado, a través de un proceso industrial del cual resulte un producto diferente no identificable con el mineral en su estado natural.

**Trituración.** Reducción inicial del tamaño del mineral hasta un grado que permita su molienda.

**Trituración primaria.** Proceso por el cual el mineral es triturado entre 1/2 a 1/6 de su tamaño original, como preparación para la siguiente etapa de reducción (segunda o tercera etapa de trituración o circuito de molienda).

**Trituración primaria, secundaria y terciaria.** Etapas en las que se realiza la trituración o la reducción de tamaño de las rocas y los minerales con el fin de reducir los costos de energía; la reducción en una sola etapa incurre en mayores gastos energéticos. Convencionalmente denominadas trituración gruesa, media y fina (primaria, secundaria y terciaria).

**Trituración selectiva.** Proceso que consiste en evitar triturar excesivamente las partículas que ya han alcanzado el tamaño deseado, lo que se consigue cribando o tamizando previamente el material triturado.

**Trituradora.** Maquinaria para romper y reducir de tamaño fragmentos o trozos grandes de roca y otros materiales.

**Trituradora de cono.** Máquina que tritura el mineral en el espacio de un cono de trituración montado en forma excéntrica, y otro cono truncado fijo llamado tazón.

**Trituradora de mandíbulas.** Máquina que utiliza placas de acero (una fija y otra móvil) para romper las rocas. Esta trituradora rompe el material al presionarlo entre las dos placas de acero (mandíbulas) que forman una cámara en forma de cuña.

**Trituradora de rodillos.** Trituradora en la cual el material es roto entre dos rodillos rotatorios que se mueven en sentido contrario a las manecillas del reloj, que pasan a través de una ranura en el fondo de la máquina. Cuando la presión es muy grande, los rodillos se separan aumentando la distancia entre ellos y, por tanto, el tamaño del grano final. Se utiliza para la trituración de menas quebradizas (frágiles) antes de la separación gravimétrica hidromecánica de fracciones de grano medio.

---

## Uu

---

**Utilidad neta.** Ganancia obtenida por una empresa en un periodo determinado después de haber pagado impuestos y otros gastos.

---

## Vv

---

**Valor en libros.** Importe por el que aparece registrado un activo en los libros contables de una empresa.

**Ventas.** Importe de todas las ventas que ha efectuado una empresa en un periodo dado, ya sea que se hayan realizado de contado o a crédito.

**Veta.** Cuerpo de roca tabular o laminar que penetra cualquier tipo de roca. Muchos depósitos de minerales importantes se presentan en forma de vetas junto con otros minerales asociados.

**Vida útil.** La vida útil de un equipo es el lapso durante el cual este está en condiciones de realizar el trabajo para el cual fue diseñado, sin que los gastos de su operación excedan los rendimientos económicos obtenidos por este, por mínimos que sean. La vida útil de una máquina depende de múltiples y complejos factores, entre los que se pueden enumerar fallas de fabricación, falta de protección contra los agentes atmosféricos, desgaste excesivo debido a uso anormal, vibraciones y fricción de sus partes móviles, manejo de diferentes operadores e irresponsabilidad de estos y descuidos técnicos, entre otros.

**Vida útil del proyecto.** Tiempo durante el cual se espera que el proyecto genere beneficios.

---

## Zz

---

**Zona de falla.** Área relacionada con un plano de falla que puede constar hasta de cientos de metros a los lados del plano de falla. Alberga numerosas fallas pequeñas en las cataclasitas y milonitas asociadas.

# 11. REFERENCIAS

Entable El Alacrán, Puerto Libertador (Córdoba). Fotografía tomada por Jaime Mojica, Servicio Geológico Colombiano



- 911 Metallurgist, P. E. (2018). 0.5 to 50 TPH Industrial Ball Mills. Retrieved November 23, 2018, disponible en <https://www.911metallurgist.com/equipment/ball-mills/>
- 911 Metallurgist (2017) stopin mining methods. Disponible en <https://www.911metallurgist.com/stoping-mining-methods/#Square-Set-Stoping>.
- Acosta, M. (2007). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, HGO. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 20-21.
- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento. Tratamiento de aguas ácidas de mina. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección de Recursos Minerales y Geoambientales. Madrid.
- Alcaldía del departamento de Córdoba (2012). Plan de Desarrollo “Para seguir avanzando”, municipio de Puerto Libertador 2012-2015, Córdoba.
- Arboleda, G., Celada, C., Forero, S., Montealegre, V., Padilla, J. C., Carmona, J. y Medina, E. (2009). Cartografía geológica y muestreo geoquímico en la parte norte de la cordillera Occidental, planchas 165 y 185 (396 km<sup>2</sup>). Contrato n.º 392 de 2007. Bogotá: Ingeominas-UTAGS-GE.
- ARL Positiva (2017). Guía de seguridad para labores mineras subterráneas. Bogotá: ARL Positiva.
- Asamblea Departamental de Córdoba (2016). Plan de Desarrollo Departamental 2016-2019.
- Austin, L. G. y Concha, F. (eds.) (1994). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. Concepción: CYTED.
- Bermúdez, J. G., Arango, M. I., Rodríguez, G., Zapata, G. y Ramírez, C. (2012). Cartografía geológica de las planchas 72 Pueblo Nuevo y 82 Montelíbano (departamento de Córdoba). Medellín: Servicio Geológico Colombiano.
- Boechat, C. L., Carlos, F. S., Gianello, C., & de Oliveira Camargo, F. A. (2016). Heavy Metals and Nutrients Uptake by Medicinal Plants Cultivated on Multi-metal Contaminated Soil Samples from an Abandoned Gold Ore Processing Site. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(10). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3096-4>.
- Bulatovic, S. M. (2007). Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice. Volume 1: Flotation of sulfide ores. USA: Elsevier Science.
- Calle B. y Salinas, R. (1986). Geología y geoquímica de la plancha 165, Carmen de Atrato. Escala 1:100.000. Medellín: Ingeominas.
- Calle, B., González, H., y De la Peña, R. (1984). Mapa geológico preliminar de la plancha 166, Jericó. Medellín: Ingeominas.
- Cediél, F., Shaw R. P. y Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block. En C. Bartolini, R. T. Buffler y J. Blickwede (eds.), *The circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79, 815-848.
- Çelebi, E. E., Öncel, M. S., & Kobya, M. (2018). Acid production potentials of massive sulfide minerals and lead-zinc mine tailings: A medium-term study. *Water Science and Technology*, 77(1), 260-268. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.541>.
- CCRR (2018) Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, Agencia Nacional de Minería, Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales. 2018.
- CMPL (2012). Plan de Desarrollo Municipio de Puerto Libertador, 2012-2015 Alcaldía. Disponible en <http://cdim.esap.edu.co/bancomedios/documentos%20pdf/puertolibertadorcordobapd2012-2015.pdf>
- Congreso de la República de Colombia, Ley 100 (1993). “Por la cual se crea el Sistema de Seguridad Social Integral y se dictan otras disposiciones”. Bogotá.
- Congreso de la República de Colombia, Ley 1607 (2012). “Por la cual se expiden normas en materia tributaria y se dictan otras disposiciones”. Bogotá.
- Congreso de la República de Colombia, Ley 1819 (2016). “Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones”. Bogotá.
- Congreso de la República de Colombia, Ley 685 (2001). “Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones”. Bogotá.
- Corporación GAIA (2008). Prospección arqueológica: área de explotación minera, municipio de Puerto Libertador-Bijao, Córdoba. Disponible en <http://biblioteca.icanh.gov.co/DOCS/MARC/texto/ARQ-1319.pdf>
- Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF) (1998). Guía para planeaciones forestales comerciales: Córdoba. Serie de Documentación n.º 34. Bogotá.
- Cromie, P., Makoundi, C., Zaw, K., Cooke, D. R., White, N., & Ryan, C. (2018). Geochemistry of Au-bearing pyrite from the Sepon Mineral District, Laos DPR, Southeast Asia: Implications for ore genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164(February), 194-218. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.014>.
- Da Luz, A. B., Sampaio, J. y França, S. C. (eds.) (2010). Tratamiento de minérios (5.ª ed.). Rio de Janeiro: CETEM, C. de T. M.
- Darling, P. (ed.) (2011). *Mining engineering-Handbooks, manuals*. USA: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Dávila Manco (2013). Córdoba minerals, corporate presentation. Disponible en <http://www.cordobamineral-scorp.com/projects/san-matias>
- Denver Equipment Company (1954). *Denver equipment company handbook*. Denver, Colorado.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2010). Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020. Disponible en [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06\\_20/7Proyecciones\\_poblacion.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf)
- Díaz, J. (2015). Marco bioestratigráfico y proveniencia de la Formación Penderisco, y su significado en la formación de un domo marginal a las Fallas de Romeral (tesis de maestría). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Fashola, M. O., Ngole-Jeme, V. M., & Babalola, O. O. (2016). Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>.
- Gómez, J., Montes, N. E., Nivia, Á. y Diederix, H. (comp.) (2015). Atlas geológico de Colombia 2015. Escala 1:500 000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- González, H., y Londoño, A. (2001). Mapa geológico del departamento de Córdoba: geología, recursos minerales y amenazas naturales, escala 1:250.000. Bogotá: Ingeominas.
- González, H., y Londoño, A. (2002). Geología de las planchas 129 Cañasgordas y 145 Urrao: memoria explicativa. Bogotá: Ingeominas.
- González-Merizalde, M. V., Menezes-Filho, J. A., Cruz-Erazo, C. T., Bermeo-Flores, S. A., Sánchez-Castillo, M. O., Hernández-Bonilla, D., & Mora, A. (2016). Manganese and Mercury Levels in Water, Sediments, and Children Living Near Gold-Mining Areas of the Nangaritza River Basin, Ecuadorian Amazon. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 71(2), 171-182. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0285-5>.

- Herrera, H. y Gómez Jaén, J. P. (2007). Diseño de explotaciones e infraestructuras mineras subterráneas. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hoek, E. y Brown, E. T. (1997). Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica. En Estándares para la caracterización geotécnica de rocas, estructuras y macizos rocosos, Primer Taller Geotécnico Interdivisional, División Chuquicamata de Codelco, Chile, La Serena, 2 al 4 de julio de 1997. Disponible en [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/MI46B/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=143138](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/MI46B/1/material_docente/bajar?id_material=143138)
- Ingeominas-CSV (2003). Inventario y diagnóstico minero ambiental del departamento de Córdoba: Anexo 2. Bogotá.
- Kabata Pendias, A. (2001). Trace elements in soils and plants (Third edition). Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC Press.
- Kellogg, J., Toto, E. y Cerón, J. (2005). Structure and tectonics of the Sinu-San Jacinto accretionary prism in northern Colombia. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.
- Kennan L. y, Pindell, J. (2009). Dextral shear, terrane accretion and basin formation in the Northern Andes: Best explained by interaction with a Pacific-derived Caribbean Plate? London: Geological Society, Special publications 2009, v. 328, 487-531.
- Knelson, B., Jones, R., (1994). "A new generation of Knelson concentrators" a totally secure system goes on line. Miner. Eng. 7 (2-3), 201-207.
- Kulla, G. y Oshust, P. (2018). El Alacrán Project, Department of Córdoba, Republic of Colombia. Cordoba Minerals Corp. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.
- Leal, L. T. C. (2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo. REVISTA ESAICA, 1(1), 53-57.
- Lilli, M. A., Nikolaidis, N. P., Moraetis, D., Kalogerakis, N., & Karatzas, G. P. (2014). Characterization and mobility of geogenic chromium in soils and river bed sediments of Asopos basin. Journal of Hazardous Materials, 281, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.037>.
- Londoño, A. C. y González, H. (1997). Geología del departamento de Córdoba. Bogotá: Ingeominas.
- López B., F. (2009). Manual de trituración y cribado (3.ª ed.). Tampere: METSO.
- MacDonald, D. Ingersoll, C. Berger, T. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 39, 20-31 pp.
- Maya, M. y González, H. (1995). Unidades litodémicas de la cordillera Central de Colombia. Boletín Geológico de Ingeominas, 35 (2-3), 43-57.
- Meza Orozco, J. J. (2010). Evaluación financiera de proyectos. Bogotá: Ecoe.MinMinas (2001). Guía minero ambiental de explotación. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- MINAMBIENTE (2005). Decreto 4741 de 2005. Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP. Tabla 3 del Anexo III.
- MINAMBIENTE (2015). Resolución 0631 de 2015. Artículo 10. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales No domesticas-ARND a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería.
- MinMinas (2015a). Glosario técnico minero. Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>.
- MinMinas (2015b). Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas. Decreto 1886 de 2015). Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- MinMinas (2015c). Ministerio de Minas y Energía. Métodos de explotación minera, Vetas y Aluvión.
- Monsacro (2006) imagen rampla y testers <https://minasderiosa.blogspot.com/2006/06/rampla-y-testeros.html>.
- Municipio de Puerto Libertador (2012). Plan de Desarrollo "Para seguir avanzando", periodo 2016-2019.
- Napier-Munn, T. J., Morrel, S., Morrison, R. D. y Kojovic, T. (1996). Mineral comminution circuits: their operation and optimisation. Queensland, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- Nivia, J. A., Marriner, G., Kerr, A. y Tarney, J. (2006). Quebradagrande Complex: a Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central cordillera of the Colombian Andes. Journal of South American Earth Sciences 21, 423-436.
- O'Neill, J. D. y Telmer, K. (2017). Métodos y herramientas: determinación del uso de mercurio en el sector de la minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE). Ginebra: ONU.
- Peláez Zapata, E. (2016). Obtención de paleoesfuerzos del sistema de fallas Cauca-Romeral en el sector norte de la cuenca Amagá, entre las localidades de Titiribí y quebrada Sinifaná (tesis de maestría). Bogotá: Universidad EAFIT.
- Pindell, J. y Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: An update. London: Geological Society, Special publications 2009, 328, 1-55.
- PDM (2012-2015) Plan de Desarrollo Municipal de Puerto Libertador –Cordoba "Para Seguir Avanzando".
- PNUD (2015). Perfil productivo del municipio de Puerto Libertador. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Portafolio (2018) Alfonso López Suárez 12 junio <https://www.portafolio.co/economia/primer-mina-de-cobre-del-pais-iniciara-produccion-en-seis-años>.
- Railsback, L. B. (2012). An Earth Scientist's Periodic Table of the Elements and Their Ions. Geological Society of America's Map and Charts, (October), 2012. <https://doi.org/10.1130/2004AESPT>.
- Ray, G. E. y Lefebure, D. V. (2000). A synopsis of iron oxide ± Cu ± Au ± P ± REE deposits of the Candalaria-Kiruna-Olympic Dam family. En Geological fieldwork 1999. BC Ministry Energy Mines Pap 2000-1, 267-271.
- Redwood, S. (2011). Córdoba Project, Department of Córdoba, Republic of Colombia. Vancouver: Wesgold Minerals Inc.
- Redwood, S. (2013). San Matías Porphyry Copper-Gold Project, Department of Cordoba, Republic of Colombia. Cordoba Minerals Corp., Vancouver, Canada. En Marroquín, et al. (2018).
- Restrepo, J. J., Ordóñez Carmona, O. y Moreno, M. (2009). A comment on "The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes by Nivia et al. [Journal of South American Earth Sciences, 21, 423-436]". Journal of South American Earth Sciences, 28, 204-205.
- Richard H. Sillitoe (2003) Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. Mineralium Deposita 38, 787-812. DOI: 10.1007/s00126-003-0379-7.

Rodríguez, G. y Arango, M. I. (2013). Formación Barroso: arco volcánico toleítico y diabasas de San José de Urama: un prisma acrecionario t-morb en el segmento norte de la cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (33), 17-38.

Rodríguez, G. y Zapata G. (2012). Características del plutonismo Mioceno Superior en el segmento Norte de la cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (31), 5-22.

Rodríguez, G., Arango, M. I., Zapata, G. y Bermúdez, J. G. (2016). Estratigrafía, petrografía y análisis multi-método de procedencia de la Formación Guineales, norte de la cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Geología*, 38 (1), 101-124.

Rodríguez, G., Zapata, G. y Gómez, J. F. (2013). Geología de la plancha 114 Dabeiba. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Sampedro Acevedo, J. (1988). Métodos de explotación minera, vetas y aluvión. (Mimeo). Ministerio de Minas y Energía.

Sciencestruck (2018). Here are the types of underground mining and their applications. Disponible en <https://sciencestruck.com/types-of-underground-mining-their-applications>

ScienceStruck (2018) Tipos de minería subterránea y sus aplicaciones. Consultado en <https://sciencestruck.com/types-of-underground-mining-their-applications>.

Sena(2001) Servicio Nacional de Aprendizaje Sena, Cartillas de sostenimiento de minas.

SGC, DRM, Grupo MMC (2016). Mapa metalogénico de Colombia. Servicio Geológico Colombiano. Disponible en <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDelInvestigacion/DireccionTecnicaRecursosMinerales/Paginas/Mapa-metalogenico-de-Colombia.aspx>.

Shahba, S. (2017). Iron Ore Waste Classification According To Unep Guidelines (Case Study: Golgohar Mining and Industrial Complex in Sirjan, Iran). *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(4), 943–956. [https://doi.org/10.15666/aeer/1504\\_943956](https://doi.org/10.15666/aeer/1504_943956).

Simonin, P. (1867). *La vie souterraine ou les mines et les mineurs*. Paris: Imprimerie Générale de CH. Lahure.

Sitio web de la Alcaldía del departamento de Córdoba: <http://www.cordoba.gov.co/cordoba.html>.

SKOOG, Holler, Nieman (2001). *Principios de Análisis Instrumental*. Quinta Edición. Editorial McGRAW-HILL. España. Pág. 219-240.

Taggart, A. F. (1945). *Handbook of mineral dressing* (vol. 1). John Wiley & Sons.

UPME (2005). *Distritos mineros: exportaciones e infraestructura de transporte*. Realizado para la UPME por el Consorcio Silva Carreño y Asociados S. A.-Hugo Millán. Bogotá: DÍgitos y Diseños.

Tuck, M. (2008) Resue Firing and dilution control in narrow vein mining . consultado en <https://es.scribd.com/document/321318937/Resue-Firing-and-Dilution-Control-in-Narrow-Vein-Minin>.

Vargas (1998, 2002). En Redwood, S. 2013. San Matías Porphyry Copper-Gold Project, Department of Córdoba, Republic of Colombia. Vancouver: Córdoba Minerals Corp.

Velásquez López, P. C., Veiga, M. M., y Hall, K. (2010). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: Identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 18 (3), 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.010>

Villagómez, D. y Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western cordilleras of Colombia: Early Cretaceous-Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos*, (160-161), 228-249.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W. y Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos* (125), 875-896.

Wills, B. A., y Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology* (8.ª ed.). Montréal: Elsevier.

Yang, J., Yu, K., & Liu, C. (2017). Chromium immobilization in soil using quaternary ammonium cations modified montmorillonite: Characterization and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.003>



# GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO **DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO**

PUERTO LIBERTADOR (CÓRDOBA)



El futuro  
es de todos

Minenergía

ISBN: 978-958-52286-9-6



SERVICIO  
GEOLÓGICO  
COLOMBIANO

