



El futuro
es de todos

Minenergía



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

MERCADERES (CAUCA)



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

MERCADERES (CAUCA)

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO. MERCADERES (CAUCA)

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

AUTORES SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Director Técnico de Laboratorios SGC

Héctor Manuel Enciso Prieto. Químico, Magíster en Administración

Supervisora del Convenio Interadministrativo 319 de 2018

Verónica Ruiz Solano. Química, MSc. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Coordinador del Grupo de Trabajo Cali SGC

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

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

Philly 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

Comité Editorial SGC: ceditorial@sgc.gov.co

Presidente

Teresa Duque

Integrantes

Virgilio Amaris
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 Almaguer (Cauca), Cooperativa de Mineros de La Sierra (Cauca) y Cooperativa de Mineros de Bolívar (Cauca)

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
Directora 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. MERCADERES (CAUCA)

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 Almaguer (Cauca), 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 a uno de los funcionarios del Servicio Geológico Colombiano llegando al campamento de la mina La Poderosa, para realizar el muestreo y trabajo de campo en el municipio de La Sierra (Cauca). Fotografía tomada por William Pulido (Servicio Geológico Colombiano).

© Servicio Geológico Colombiano



SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

OSCAR PAREDES ZAPATA
Director general

HÉCTOR MANUEL ENCISO PRIETO
Director técnico de laboratorios

JUAN PABLO MARÍN ECHEVERRY
Secretario general

DALIA INÉS OLARTE MARTÍNEZ
Oficina Asesora Jurídica
Grupo de Trabajo Contratos y Convenios (E)

VERÓNICA RUÍZ SOLANO
Supervisora 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. MERCADERES (CAUCA)* se traduce en un aporte significativo del Servicio Geológico Colombiano a la minería en Colombia, atendiendo 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 mandatos, nacionales e internacionales, orientadas hacia la eliminación del uso del mercurio en la actividad industrial minera.

Ésta guía metodológica y la generación de conocimiento geocientífico, en general, que realiza el Servicio Geológico Colombiano es consonante con lo preceptuado en las bases para la consolidación de una política de Estado en ciencia, tecnología e innovación (*artículo 3º. 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, dentro de los ámbitos de su competencia como Entidad perteneciente al Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación, genera nuevo conocimiento geocientífico, aportando en la solución de la necesidad que tiene el país de fomentar alternativas tecnológicas de producción más limpia para los procesos de beneficio de oro que conduzcan a la eliminación del uso del mercurio.

A lo largo de ésta 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 Mercaderes, los objetivos y el alcance de la guía; Metodología de Trabajo; Aspectos Geológicos, Minero, Metalúrgicos, Químico 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 tecnológicos, sino que se consideró relevante y necesario realizar un análisis económico y financiero riguroso y real, con fin de establecer la conveniencia de emprender exitosamente un proyecto minero y efectuar una asignación eficiente de recursos. En este capítulo se incluyen los fundamentos metodológicos, mínimamente necesarios, para que el minero pueda realizar un ejercicio de planeación y evaluación financiera de la operación futura de su 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 Mercaderes (Cauca) 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 La Sierra (Cauca) | 31 |
| 3.3. Municipio de Almaguer (Cauca) | 32 |
| 3.4. Municipio de Bolívar (Cauca) | 33 |
| 3.5. Vías de acceso | 34 |
| 3.6. Ubicación de las minas y plantas de beneficio | 34 |

4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

| | |
|---|----|
| 4.1. Fundamentos teóricos: geología y yacimientos minerales | 39 |
| 4.1.1. Generalidades de yacimientos auríferos | 40 |
| 4.1.2. Identificación de minerales en el frente de mina | 45 |
| 4.1.3. Sulfuros asociados a la mena | 46 |
| 4.2. Geología del distrito minero de Mercaderes (Cauca) | 48 |
| 4.3. Geología regional | 48 |
| 4.3.1. Geología local | 48 |
| 4.3.1.1. Municipio de La Sierra | 48 |
| 4.3.1.2. Municipio de Almaguer | 50 |
| 4.3.1.3. Municipio de Bolívar | 50 |
| 4.3.2. Geología estructural | 52 |
| 4.3.3. Alteración hidrotermal | 52 |
| 4.3.4. Metalogénesis y mineralización aurífera | 56 |
| 4.3.4.1. Mineralización aurífera en el municipio de La Sierra | 57 |
| 4.3.4.2. Mineralización aurífera en el municipio de Almaguer | 61 |
| 4.3.4.3. Mineralización aurífera en el municipio de Bolívar | 66 |
| 4.3.5. Modelo metalogénico | 67 |
| 4.3.6. Unidades geometalúrgicas (UGM) | 68 |
| 4.4. Análisis petrográficos de material de proceso metalúrgico | 70 |
| 4.4.1. Liberación de sulfuros | 70 |
| 4.4.1.1. Liberación de sulfuros en el municipio de La Sierra, mina La Poderosa | 70 |
| 4.4.1.2. Liberación de sulfuros en la mina El Higuierón, municipio de Almaguer | 72 |
| 4.4.1.3. Liberación de sulfuros en la mina Monterrucio, municipio de Bolívar | 74 |
| 4.4.2. Liberación de oro | 76 |
| 4.4.2.1. Liberación de oro en la mina La Poderosa, municipio de La Sierra | 76 |
| 4.4.2.2. Liberación de oro en la mina El Higuierón, municipio de Almaguer | 77 |
| 4.4.2.3. Liberación de oro en la mina Monterrucio, municipio de Bolívar | 78 |
| 4.5. Consideraciones en geología y mineralogía para el beneficio | 80 |
| 4.6. Conclusiones en aspectos geológicos, mineralógicos, químicos, ambientales y metalúrgicos | 82 |

5. ASPECTOS MINEROS

| | |
|---|-----|
| 5.1. Fundamentos técnico-mineros | 85 |
| 5.1.1. Etapas de un proyecto minero | 85 |
| 5.1.1.1. Métodos de explotación | 86 |
| 5.1.2. Métodos de arranque | 93 |
| 5.1.3. Tipos de sostenimiento | 93 |
| 5.1.4. Tipos de ventilación | 96 |
| 5.1.5. Carga y transporte de mineral | 97 |
| 5.2. Estudio minero de la zona de Mercaderes | 98 |
| 5.2.1. Aspectos mineros del municipio de La Sierra (Cauca) | 99 |
| 5.2.2. Aspectos mineros del municipio de Almaguer (Cauca) | 101 |
| 5.2.3. Aspectos mineros del municipio de Bolívar (Cauca) | 102 |
| 5.3. Análisis minero | 103 |
| 5.3.1. Proyecciones inferidas para la explotación minera en el municipio de La Sierra | 105 |
| 5.3.2. Proyecciones inferidas para la explotación minera en el municipio de Almaguer | 105 |
| 5.3.3. Proyecciones inferidas para la explotación del municipio de Bolívar | 107 |
| 5.4. Consideraciones mineras | 108 |
| 5.4.1. Método de explotación | 108 |
| 5.4.2. Sostenimiento | 111 |
| 5.4.3. Ventilación | 112 |
| 5.4.4. Minero-ambientales | 113 |
| 5.5. Conclusiones en aspectos mineros | 114 |

6. ASPECTOS METALÚRGICOS

| | |
|--|-----|
| 6.1. Fundamentos técnicos del proceso de beneficio metalúrgico | 117 |
| 6.1.1. Beneficio de minerales en planta | 117 |
| 6.1.2. Proceso de conminución (trituration y molienda) | 118 |
| 6.1.2.1. Trituración primaria (gruesa) | 118 |
| 6.1.2.2. Trituración secundaria (fina) | 119 |
| 6.1.2.3. Molienda | 121 |
| 6.1.3. Clasificación granulométrica | 124 |
| 6.1.4. Clasificación hidráulica | 124 |
| 6.1.5. Concentración de minerales auríferos por gravimetría | 126 |
| 6.1.5.1. Concentración gravitacional o gravimétrica | 127 |
| 6.1.6. Concentración de minerales auríferos por flotación | 130 |
| 6.1.7. Cianuración | 131 |
| 6.1.8. Fundición | 134 |
| 6.1.9. Tratamiento de residuos sólidos en aguas | 135 |

7. ASPECTOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

| | |
|---|-----|
| 7.1. Contribución química a la caracterización, control de procesos metalúrgicos y ambientales | 138 |
| 7.2. Fundamentos teóricos: métodos y aplicaciones químicas y ambientales | 139 |
| 7.2.1. Contaminación por mercurio | 139 |
| 7.2.3. Caracterización química y ambiental | 142 |
| 7.2.3.1. Aplicación de la espectrometría de fluorescencia de rayos X | 143 |
| 7.2.3.2. Aplicación de la espectrofotometría de absorción atómica | 143 |
| 7.2.3.3. Aplicación de la técnica espectrofotometría de ultravioleta visible | 144 |
| 7.2.3.4. Aplicación de la potenciometría de ion cianuro | 144 |
| 7.2.3.5. Tratamientos de descomposición de cianuro | 145 |
| 7.2.3.6. Ensayo en laboratorio de la descomposición de cianuro libre y complejo a formas estables | 147 |
| 7.2.3.7. Pruebas ambientales para relaves | 147 |
| 7.3. Puntos de muestreo visitados y muestras puntuales analizadas | 149 |
| 7.3.1. Municipio La Sierra, entable El Triunfo, quebrada El Aguacate y río Esmita | 149 |
| 7.3.2. Municipio Almaguer, entable El Higuierón, quebrada Severino | 150 |
| 7.3.3. Municipio Bolívar | 150 |
| 7.4. Análisis químicos y ambientales | 151 |
| 7.4.1. Análisis elemental mediante la técnica de fluorescencia de rayos X en material de cabeza | 151 |
| 7.4.2. Caracterización de relaves | 152 |

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| 7.4.3. Pruebas ambientales | 155 | 9.3.1. Resultados e interpretación de indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 1 | 215 |
| 7.4.3.1. Determinación de la toxicidad por lixiviación | 155 | 9.4. Estudio financiero de la operación actual vs. la operación futura en la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 1 | 215 |
| 7.4.3.2. Mercurio en aguas superficiales | 156 | 9.4.1. Resultados de la operación actual del beneficio de oro en la zona minera de Mercaderes | 216 |
| 7.4.3.3. Caracterización de sedimentos activos | 157 | 9.4.2. Resumen de indicadores de operación actual vs. operación futura, ruta metalúrgica 1 | 218 |
| 7.4.3.4. Vertimientos en la zona | 158 | 9.4.3. Análisis de resultados de indicadores de operación actual vs. operación futura de la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 1 | 218 |
| 7.4.3.5. Balance ácido base (test ABA) para determinar el DAM | 158 | 9.5. Consideraciones sobre la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Mercaderes | 220 |
| 7.6. Conclusiones Químicas y ambientales | 163 | 9.6. Consideraciones sobre la operación futura de beneficio de oro en la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 1 | 221 |
| 7.7. Recomendaciones químicas y ambientales | 164 | 9.7. Metodología para el estudio y evaluación financiera del proyecto en la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 2 | 223 |
| 8. RUTA METALÚRGICA PROPUESTA PARA LA ZONA MINERA | | 9.7.1. Estudio financiero | 223 |
| 8.1. Proceso de beneficio desarrollado actualmente | 167 | 9.7.1.1. Identificación y valoración de la inversión inicial | 223 |
| 8.1.1. Almaguer | 167 | 9.7.1.2. Identificación y valoración de costos de la fase de extracción | 225 |
| 8.1.2. La Sierra | 167 | 9.7.1.3. Identificación y valoración de costos de la fase de beneficio | 229 |
| 8.1.3. Bolívar | 167 | 9.7.1.4. Identificación y valoración de ingresos de operación | 233 |
| 8.2. Tenores de oro en las plantas visitadas | 168 | 9.7.2. Evaluación financiera | 235 |
| 8.3. Pruebas metalúrgicas de laboratorio | 170 | 9.7.2.1. Construcción del flujo de caja del proyecto | 235 |
| 8.3.1. Peso específico, índice de Hardgrove en índice de trabajo de Bond (WI) | 170 | 9.7.2.2. Aplicación de métodos para evaluar proyectos | 237 |
| 8.3.2. Distribución de tamaño de partículas de las muestras preparadas | 170 | 9.8. Estudio y evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 2 | 238 |
| 8.3.3. Acondicionamiento del mineral para concentración gravimétrica | 171 | 9.8.1. Resultados e interpretación de indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 2 | 240 |
| 8.3.4. Planta de beneficio Higuerón | 172 | 9.9. estudio financiero de la operación actual con la operación futura en la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 2 | 241 |
| 8.3.5. Planta La Poderosa | 174 | 9.9.1. Resultados de la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Mercaderes | 241 |
| 8.3.5. Planta Monterrusio | 176 | 9.9.2. Resumen de indicadores de la operación actual vs. la operación futura, ruta metalúrgica 2 | 243 |
| 8.4. Proceso de beneficio sugerido | 178 | 9.9.3. Análisis de resultados de indicadores de operación actual vs. operación futura en la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 2 | 244 |
| 8.4.1. Proceso 1: incluyendo cianuración | 178 | 9.10. Consideraciones sobre la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Mercaderes | 245 |
| 8.4.2. Proceso 2. Planta de concentrados auríferos | 178 | 9.11. Consideraciones sobre la operación futura de beneficio de oro en la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 2 | 246 |
| 8.5. Balances de materia de los procesos sugeridos | 181 | | |
| 8.6. Montaje de la planta de beneficio sugerida | 182 | | |
| 8.7. Diagrama de flujo correspondiente a la planta de beneficio sugerida | 184 | | |
| 8.8. Conclusiones metalúrgicas acerca de las operaciones actuales | 186 | | |
| 8.9. Conclusiones a partir de los ensayos metalúrgicos | 186 | | |
| 8.9.1. Conclusiones relativas a La Sierra | 186 | | |
| 8.9.2. Conclusiones relativas a Almaguer | 187 | | |
| 8.9.3. Conclusiones relativas a Bolívar | 188 | | |
| 8.10. Conclusiones acerca de la sustitución de la amalgamación | 189 | | |
| 9. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO | | 10. GLOSARIO | |
| 9.1. Fundamentos teóricos para la evaluación financiera del proyecto | 192 | | |
| 9.1.1. Generalidades sobre los proyectos de inversión | 192 | | |
| 9.1.1.1. Definición | 192 | | |
| 9.1.1.2. Clasificación | 192 | | |
| 9.1.1.3. El ciclo de los proyectos | 192 | | |
| 9.1.2. Estudio y evaluación financiera de proyectos de inversión | 194 | | |
| 9.1.2.1. Propósito del estudio financiero | 194 | | |
| 9.1.2.2. Etapas del estudio financiero | 194 | | |
| 9.1.2.3. Propósito de la evaluación financiera | 195 | | |
| 9.1.2.4. Etapas de la evaluación financiera | 195 | | |
| 9.2. Metodología para el estudio y evaluación financiera del proyecto en la zona minera+ de Mercaderes (ruta metalúrgica 1) | 197 | | |
| 9.2.1. Estudio financiero | 197 | | |
| 9.2.1.1. Identificación y valoración de la inversión inicial | 198 | | |
| 9.2.1.2. Identificación y valoración de costos de la fase de extracción | 200 | | |
| 9.2.1.3. Identificación y valoración de costos de la fase de beneficio | 204 | | |
| 9.2.1.4. Identificación y valoración de ingresos de operación | 209 | | |
| 9.2.2. Evaluación financiera | 209 | | |
| 9.2.2.1. Construcción del flujo de caja del proyecto | 209 | | |
| 9.2.2.2. Aplicación de métodos para evaluar proyectos | 211 | | |
| 9.3. Estudio y evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Mercaderes, ruta metalúrgica 1 | 212 | | |
| | | 11. REFERENCIAS | |

INTRODUCCIÓN

Mediante la Resolución n.º 4 0391 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.
- Altos niveles de ilegalidad y/o informalidad en la actividad minera.
- La necesidad de articulación entre los diferentes estamentos del Estado para la eliminación del 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 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.

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 Almaguer (Cauca), 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

Plaza de Almaguer (Cauca). Fotografía tomada por Verónica Ruiz, Servicio Geológico Colombiano



1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El potencial minero del Cauca es bien conocido desde antaño. La colonización española entró en búsqueda de oro y otros metales de valor, situación que dio pie a la fundación de municipios como Almaguer, con un claro enfoque minero. El SGC ha querido investigar este gran potencial geológico-minero, para lo cual ha desarrollado publicaciones como el Mapa metalogénico (Ingeominas-SGC, 1999, 2016) y el Atlas geo-químico (SGC, 2016), en los que ha destacado un distrito minero de oro y plata entre Almaguer y La Vega denominado Piedra Sentada y Dominical, en varios de cuyos sitios se ha detectado presencia de Au (Ag_Cu_Pb_Zn_Mo_As_Sb) en prospectos y depósitos epitermales de sulfuración baja a intermedia. No obstante, el mayor potencial es de Au y Cu diseminado en depósitos de gran tonelaje, tipo pórfidos.

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 vetiformes y franjas mineralizadas en zonas de cizalla y falla con alto tenor y bajo tonelaje; por otro lado, durante el último superciclo de los commodities, compañías privadas como la AngloGold Ashanti, Anglo American, Carboandes, etc., mostraron interés en explorar el territorio en busca de mineralizaciones diseminadas de gran tonelaje y bajo tenor de oro y cobre. Existen varios prospectos bien conocidos desde hace décadas, como Piedra Sentada y Dominical (JICA, 1987) y otros más recientes, como cerro Gordo.

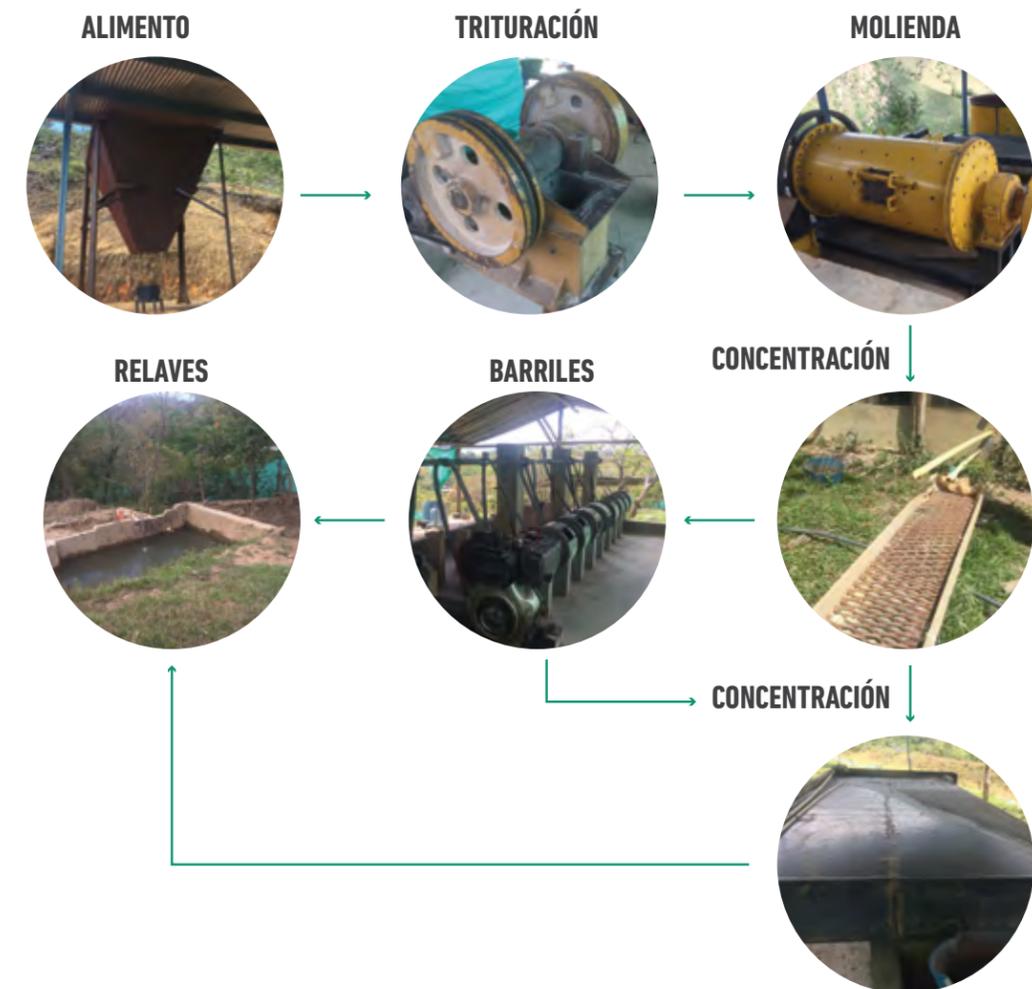


Fotografía 11. Serie de cocos para amalgamación. Fuente: autores.

Las operaciones mineras se realizan con un bajo a escaso conocimiento técnico, por lo general en galerías o guías a lo largo de la veta o zona mineralizada, y en las operaciones más grandes con cruzadas para acceder a diferentes frentes de trabajo, cuando hay varias estructuras mineralizadas en áreas menores a 200 m. Es común encontrar mineros trabajando en socavones en estéril a manera de cruzadas, en busca de vetas conocidas en las zonas aledañas. Las estructuras están cerca a la superficie y presentan espesores inferiores a los dos metros. En la región de La Sierra las estructuras presentan diferentes eventos de mineralización en franjas, por lo cual es necesario realizar una minería selectiva de manera manual minando venillas de 5 a 10 cm de espesor, que los mineros identifican por el alto contenido de sulfuros (superior al 5%). En Almaguer, en cambio, la mena es diversa, con corredores mineralizados en la roca de caja y en vetas y zonas de cizalla. Del mismo modo, los mineros artesanales hacen una clasificación visual del material basándose en el contenido de sulfuros y en cateos manuales, en busca de trazas de oro libre, con lo cual deciden si envían el material a proceso de beneficio o si continúan el trabajo minero como tal. En el caso de las mineralizaciones de Bolívar, las zonas mineralizadas están asociadas a contactos con rocas ígneas que están mineralizados.

Minado. Los trabajos de MAPE no sobrepasan las 20 t/día de material trabajado. Por lo general el arranque de material se realiza con explosivos caseros (glucosa y clorato) o indugel, utilizando taladros eléctricos y, en menor proporción, taladros neumáticos para la malla de explosivos. El material es clasificado manualmente para disminuir la dilución con la roca de caja y colectado en malacates de hasta una tonelada, en las operaciones más grandes, o catangas (fibras de costal), en las operaciones pequeñas.

Beneficio. El 95% de las MAPE, generalmente se vincula a un proceso de beneficio por amalgamación asociativo; las otras venden concentrados. También se identificaron algunos procesos de concentración en mesas tipo wifley, tanto en Bolívar como en Almaguer, y en construcción de procesos de beneficio por cianuración (ej.: La Poderosa, en la Sierra, y algunas en Almaguer).



1.2. DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD



Fotografía 1.2. Mercurio en batea para amalgamación. Fuente: autores.

El Estado colombiano, atendiendo a un claro compromiso por 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 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.

- Desconocimiento de alternativas de tecnologías más limpias para 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.



Fotografía 1.3. Socialización del proyecto con los mineros de Mercaderes (Cauca). Fuente: autores.

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, junto con 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 con 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.

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 Mercaderes (Cauca) 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 permitan 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 Mercaderes (Cauca).

1.4. ALCANCE

Esta guía metodológica propone procesos de producción más limpia, sin uso de mercurio, mediante alternativas tecnológicas que permitan un mejor aprovechamiento del mineral, una mayor eficiencia y productividad en las operaciones de beneficio. Lo anterior, 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 Mercaderes (Cauca) 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

Toma de muestras para análisis en laboratorio. Fotografía tomada por Harold Concha, 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.

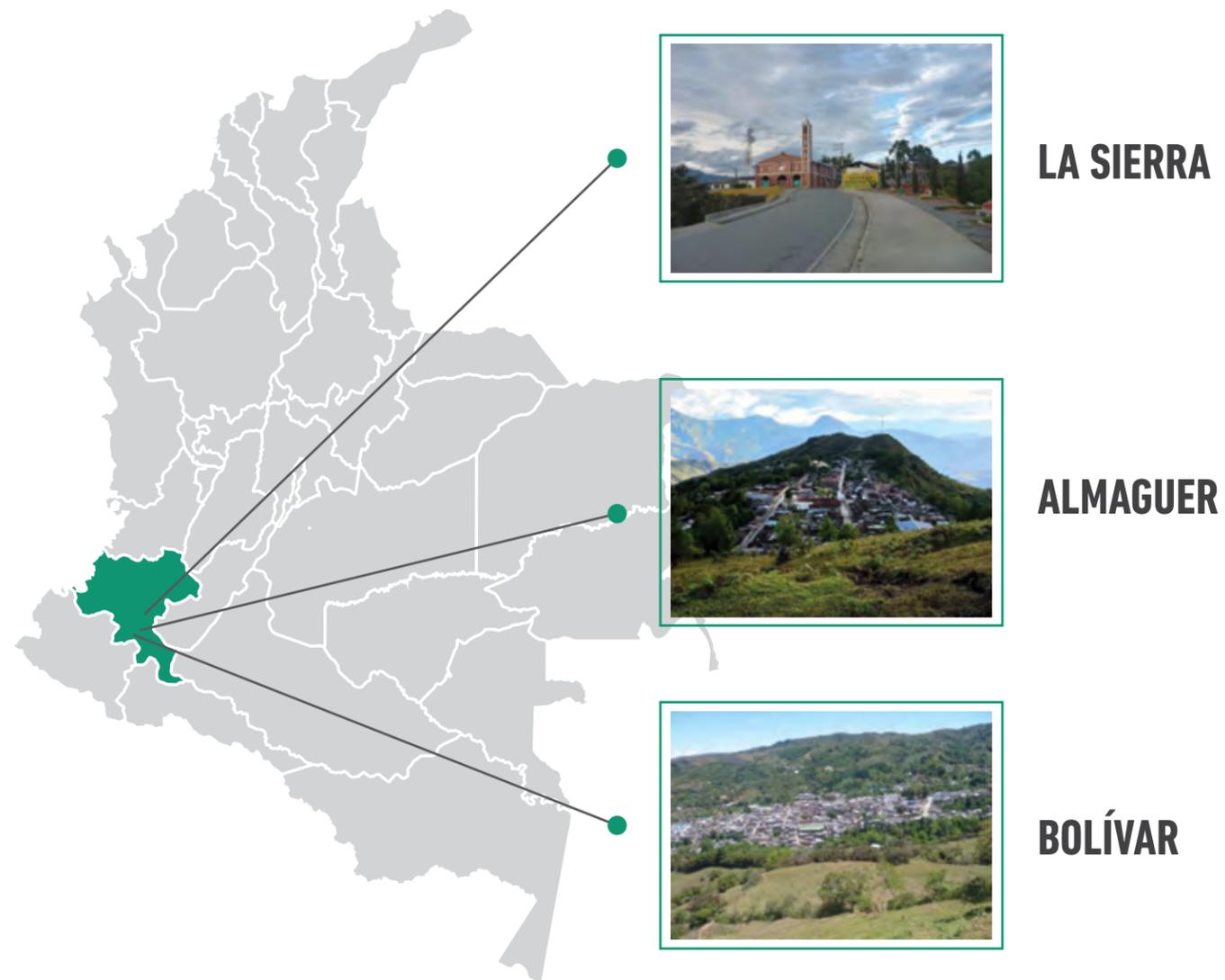
Mercado de Almaguer (Cauca). Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano



3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona minera se localiza en los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar, en el departamento del Cauca, en el flanco occidental de la cordillera Central. Estos municipios pertenecen a la cuenca del río Guachicono, y están situados a alturas que varían entre los 1000 m.s.n.m., en el río Guachicono, hasta los 3200 m.s.n.m., en el extremo nororiental. Esta área pertenece al distrito minero El Bordo-Patía del Mapa metalogénico del Servicio Geológico Colombiano. La zona corresponde a las planchas topográficas 364IIIB, 364IIID, 364IVA, 364IVC, 387IB, 387ID, 387IIA, 387IIC, 387IIB y 387IVA, a escala 1:25.000, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Figura 3.1. Ubicación Geográfica de los municipios de estudio. Fuente: autores.



Localización:
2° 10' latitud norte. 75° 46' longitud oeste

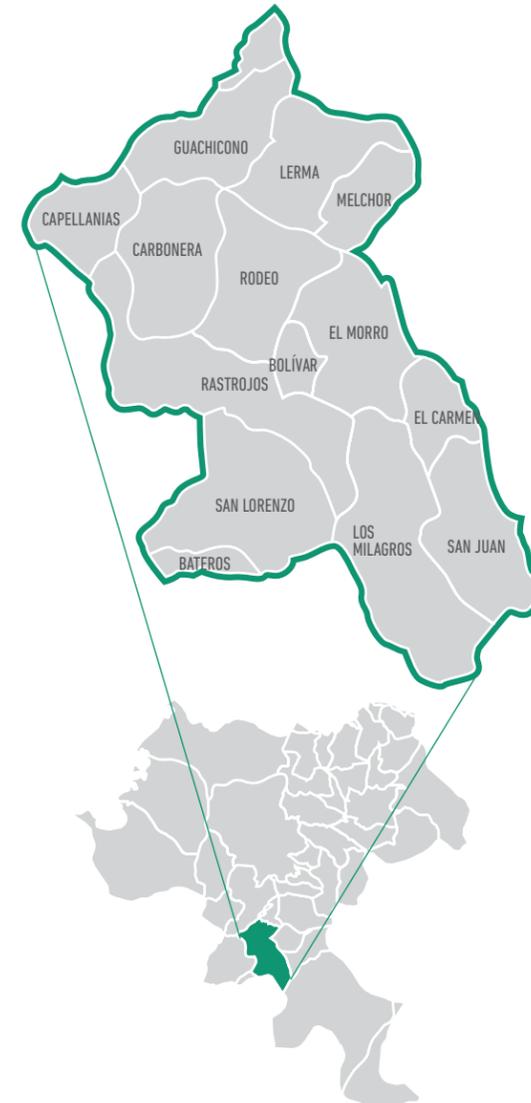
Extensión:
217 km²

Altitud de la zona urbana:
1.760 m.s.n.m.

Temperatura promedio:
18 °C

Límites:
Al norte limita con el municipio de Rosas, al sur con La Vega, al oriente con Sotará, y al occidente con los municipios de El Tambo y Patía.

Figura 3.2. Ubicación del municipio de La Sierra. Fuente: autores.



3.2. MUNICIPIO DE LA SIERRA (CAUCA)

Economía: La agricultura es la actividad económica de mayor importancia del municipio de La Sierra. Sus suelos fértiles de origen volcánico y la variedad de climas abren la puerta al cultivo de múltiples productos, siendo los más importantes el café y la caña panelera. El café orgánico tiene la posibilidad de salir al mercado internacional, mientras que los demás productos se comercian en el mercado local o en la capital del departamento.

Medio ambiente: Según datos de la Secretaría de Planeación Municipal, el municipio de La Sierra cuenta con 2.119 hectáreas de bosque nativo y 99 hectáreas de cuencas y microcuencas. El paisaje en general se compone de laderas empinadas; sobresalen los filos de las montañas, que a la vez corresponden a los cauces de las fuentes hídricas que bañan el municipio.

La Sierra posee gran cantidad de fuentes hídricas en forma de ríos y quebradas que al final desembocan en el río Patía. Entre las subcuencas más importantes se encuentran los ríos Esmita, Guachicono y San Pedro; entre las microcuencas de mayor relevancia están las quebradas Seca y Guavito; estos afluentes se convierten en puntos importantes de desarrollo para la región.

Población: La población del municipio de La Sierra, según las proyecciones realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) en el año 2019, es de 10.555 personas, de las cuales 1.510 habitan en la zona urbana, y 9.045 en la zona rural.

Localización:

1° 54' 55" latitud norte y a los 2° 45' 31" longitud occidente

Extensión:

320 km²

Altitud de la zona urbana:

2.312 m.s.n.m.

Temperatura promedio:

17 °C

Límites:

Al norte, el municipio de La Vega; al sur, los municipios de Bolívar y San Sebastián; al oriente, el municipio de San Sebastián, y al occidente, el municipio de Sucre.

3.3. MUNICIPIO DE ALMAGUER (CAUCA)

Economía: El desarrollo económico de Almaguer se basa en la producción agrícola y ganadera. Se produce café, frijol, maíz, yuca, arracacha, papa, cebolla, repollo, zanahoria, frutales y caña panelera. El comercio de estos productos se realiza localmente, pero es insuficiente para satisfacer las necesidades de la población, razón por la cual es necesario llevar a cabo un circuito de mercados con las poblaciones cercanas y la capital del departamento.

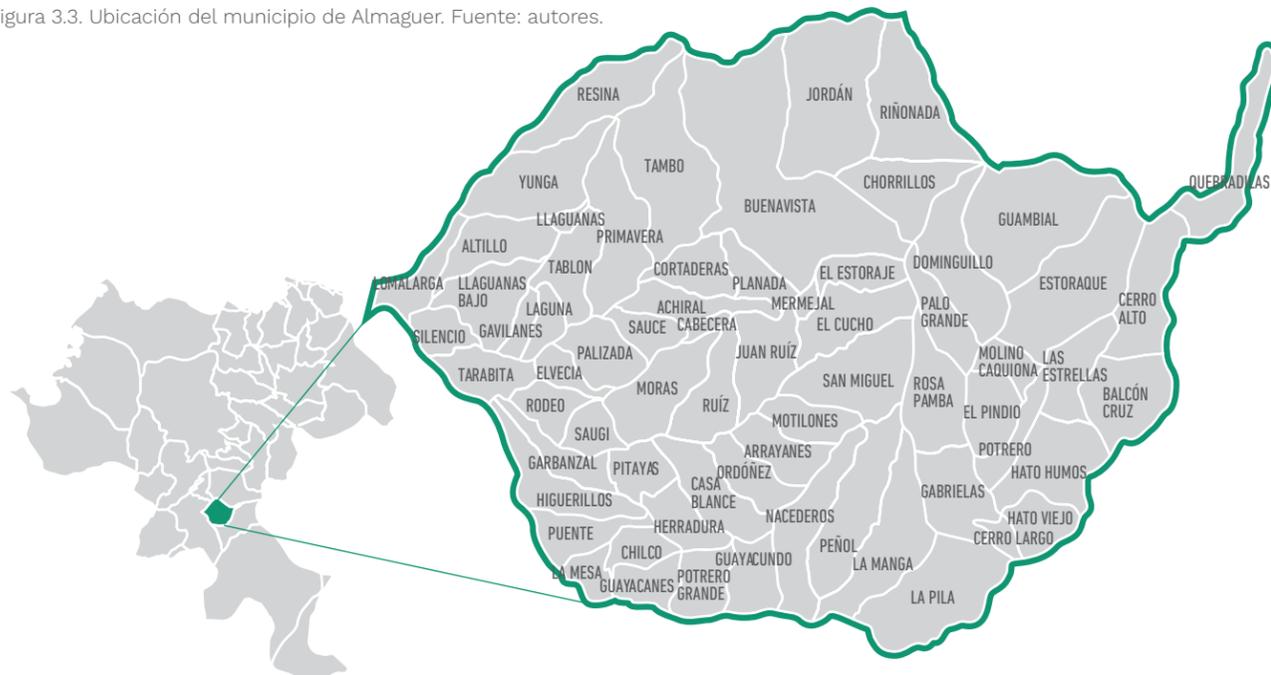
Medio ambiente: Gracias a su ubicación en el Macizo Colombiano, Almaguer presenta un relieve montaño-

so rodeado de abundantes nacimientos de agua. Sus afluentes más importantes son los ríos Caquiona y Humus, por el oriente; el río Ruiz, por el sector central, y el río Marmato por el occidente, todos los cuales desembocan en el río San Jorge. Actualmente la sostenibilidad ambiental se está viendo comprometida debido a la aparición de los cultivos ilícitos, fenómeno que se acentúa en las partes más altas de la región. Según la Secretaría de Planeación del municipio, existen 2.174,2 hectáreas de bosque nativo, 4.895,6 hectáreas declaradas de reserva, 23.684 hectáreas de cuencas y microcuencas hídricas y un área para reforestación.

Población: La población de Almaguer se caracteriza por su heterogeneidad sociocultural, en la cual interactúan diferentes grupos sociales, como los indígenas, campesinos y colonos. Las reservas indígenas se localizan en el corregimiento de Caquiona.

La población para el año 2019, según las proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, es de 21.374 personas, 1.587 de las cuales habitan en la zona urbana, y 19.787 en la zona rural.

Figura 3.3. Ubicación del municipio de Almaguer. Fuente: autores.

**Localización:**

1° 50' 09" latitud norte, 76° 57' 59" longitud occidente

Extensión:

755 km²

Altitud de la zona urbana:

1.777 m.s.n.m.

Temperatura promedio:

19 °C

Límites:

Al norte limita con los municipios de Patía y Sucre; al sur, con los municipios de Santa Rosa y el departamento de Nariño; al oriente, con los municipios de Almaguer y San Sebastián; al occidente, con los municipios de Florencia y Mercaderes.

3.4. MUNICIPIO DE BOLÍVAR (CAUCA)

Economía: La actividad económica del municipio de Bolívar se basa en la agricultura, precedida de la actividad pecuaria y, en menor proporción, el desarrollo de la minería de extracción de oro.

Los sistemas productivos de mayor relevancia en el sector agrícola son el beneficio de caña panelera y la producción de café; existe una dinámica económica media para la producción y comercio de plátano, yuca, frutales como lulo, mora, papaya y cítricos. El sector pecuario se orienta mayormente a la explotación de ganado vacuno y porcino, la producción piscícola y de especies menores.

Medio ambiente: El relieve en el municipio de Bolívar es predominantemente montañoso, resultado de los diferentes procesos geológicos que dieron formación al sistema del Macizo Colombiano; estas variaciones de altitud en la topografía, que va desde los 570 a los 3.600 m.s.n.m., dan origen a microclimas en los que las temperaturas varían de cálidas a muy frías.

El municipio pertenece a la cuenca del río Patía, lo cual constituye un gran valor ecosistémico, ya que dicha cuenca se considera un corredor biológico entre el Macizo Colombiano y el Chocó biogeográfico. Sus principales afluentes son las subcuencas de los ríos Guachicono, San Jorge y Sambingo. La calidad de los recursos hídricos se ve afectada por distintos contaminantes, como residuos agroquímicos, sólidos y líquidos. En Bolívar se encuentran áreas de conservación de gran importancia, como el parque nacional Complejo Volcánico Doña Juana Cascabel; además, cuenta con humedales, áreas de páramo que funcionan como agentes reguladores de la red hídrica del municipio.

Población: Según los datos de la proyección del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, para el año 2019 la población en el municipio será de 44.868 personas, 5.284 de las cuales habitarán en el área urbana, y 39.584 en la zona rural. En el municipio se da la interacción entre distintos grupos étnicos, predominando el mestizo, seguido de los indígenas y afrodescendientes.

Figura 3.4. Ubicación del municipio de Bolívar. Fuente: autores.

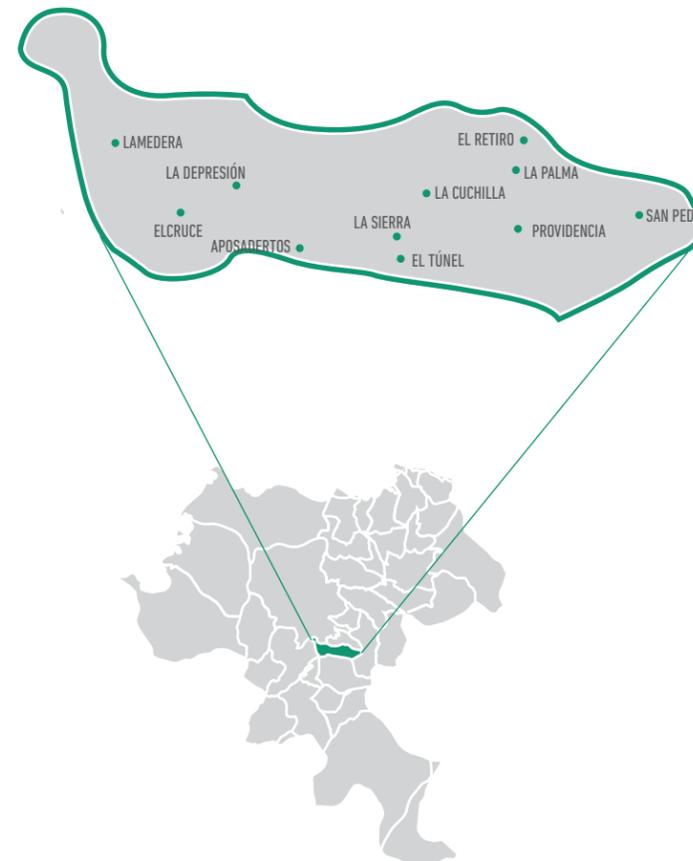


Figura 3.5. Localización de las áreas mineras. Fuente: autores.

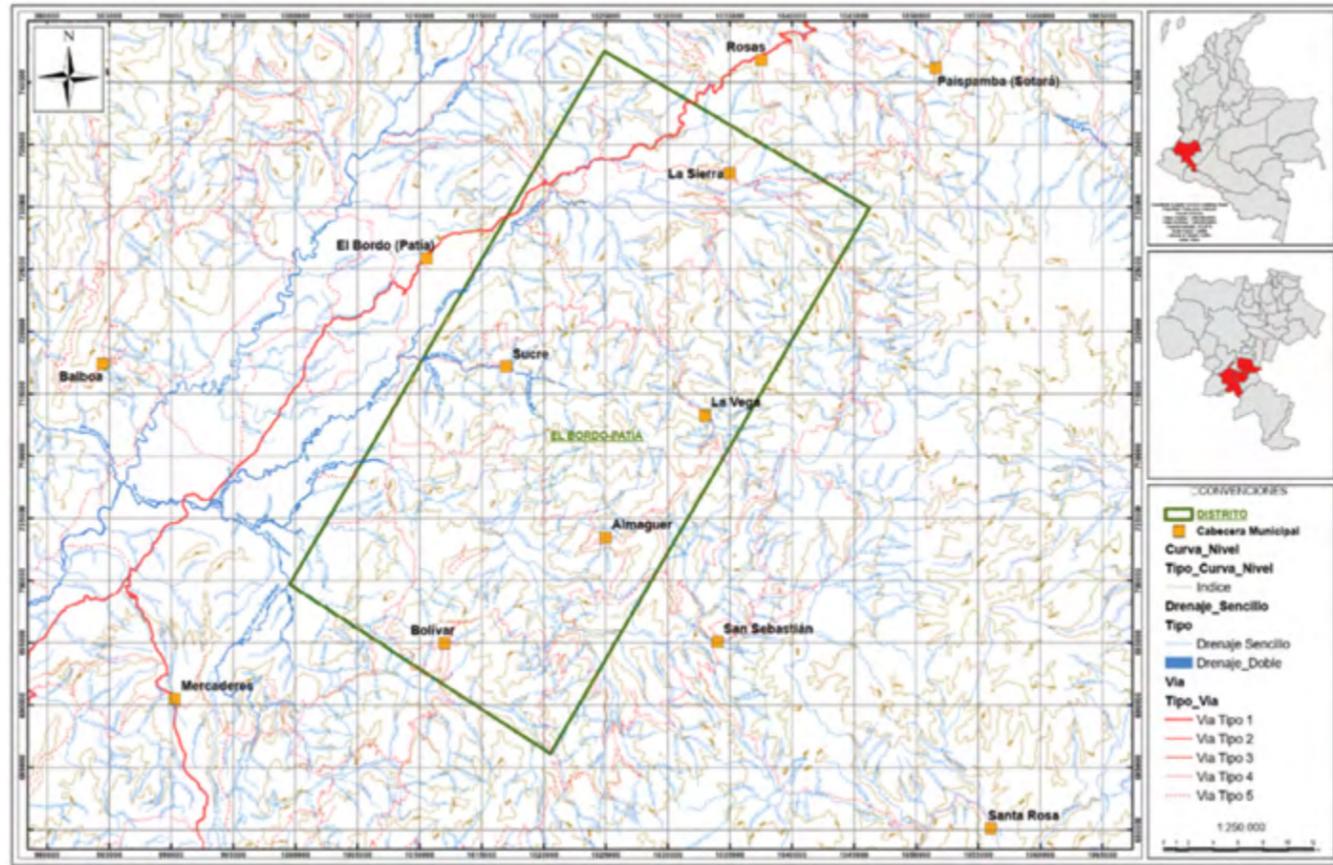
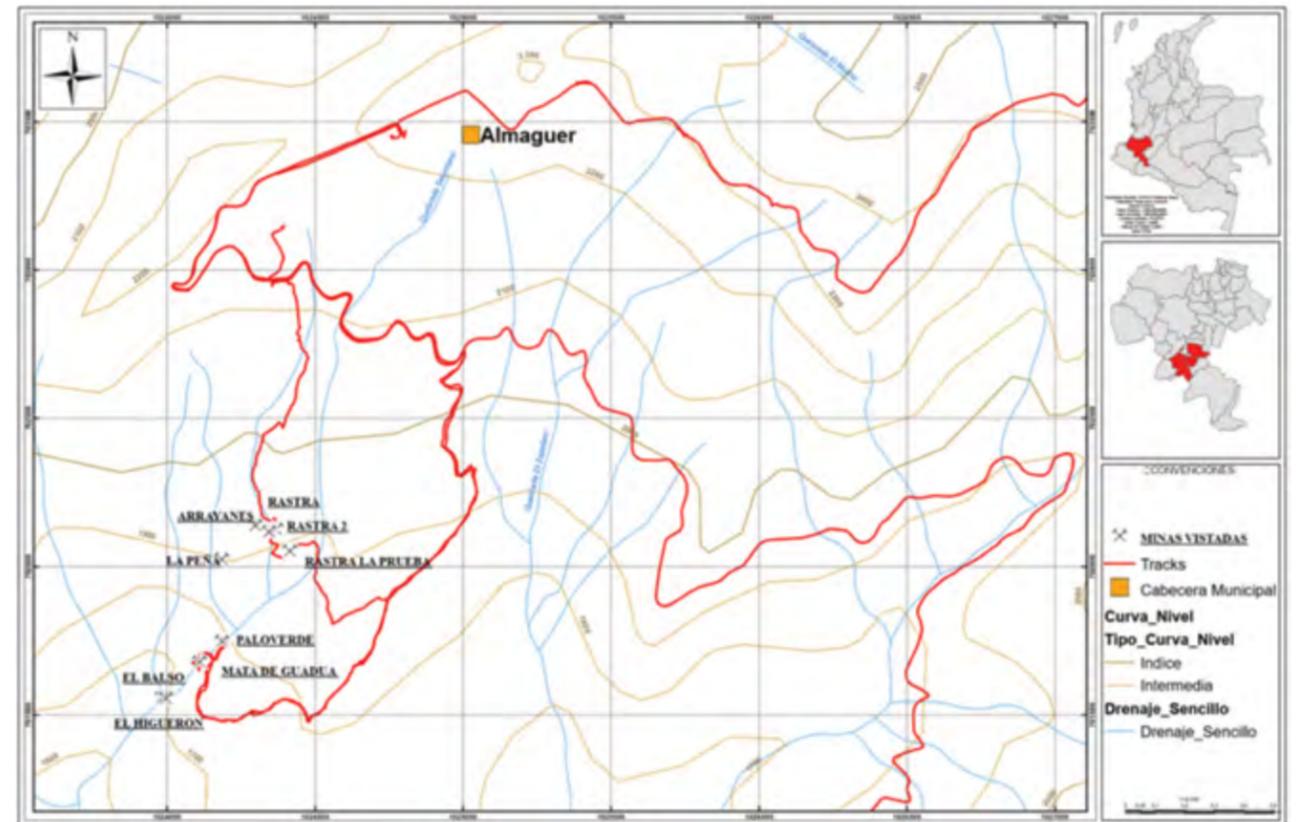


Figura 3.6. Localización de minas, municipio de La Sierra. Fuente: autores.



Figura 3.7. Localización de minas, municipio de Almaguer. Fuente: autores.



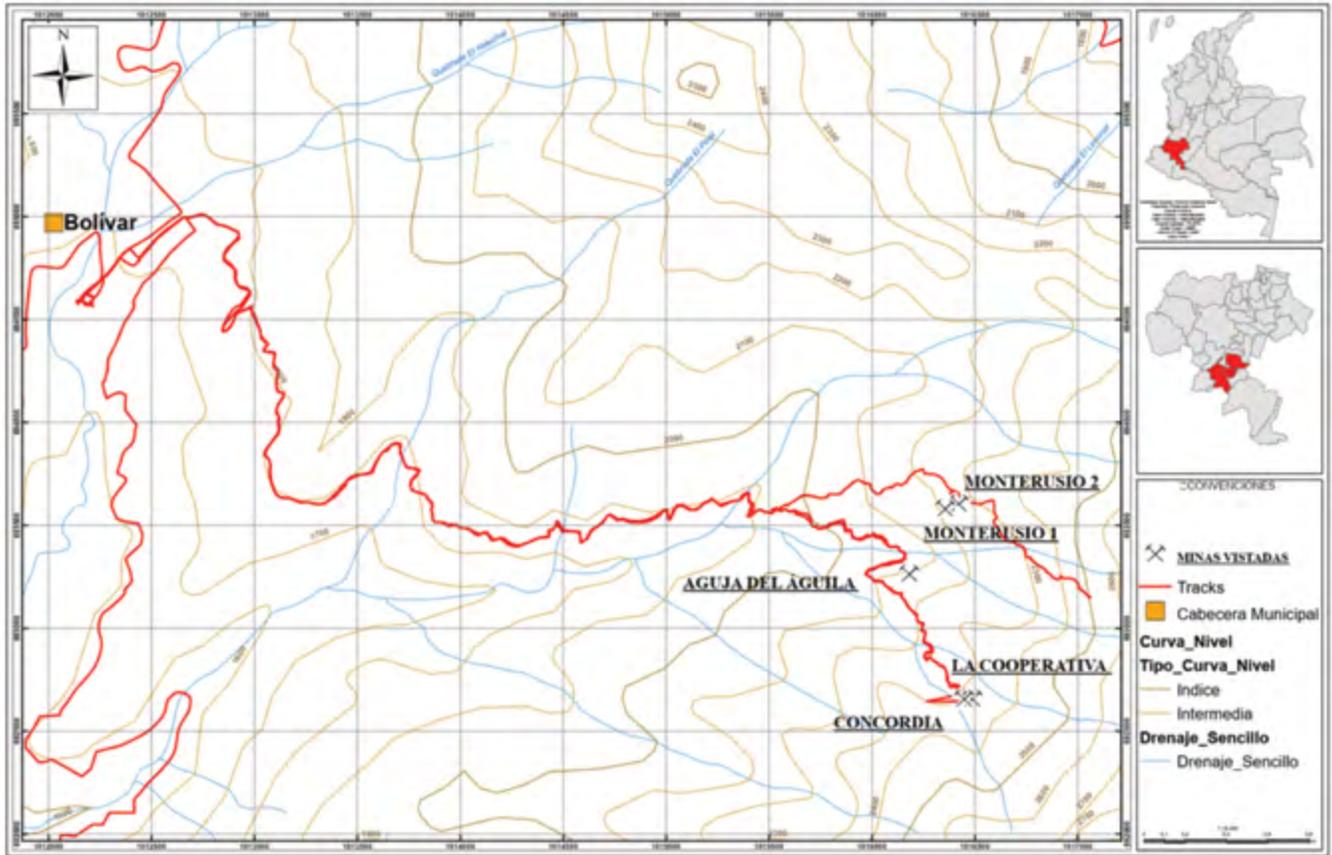
3.5. VÍAS DE ACCESO

La principal vía de acceso es la carretera Panamericana entre Popayán y El Bordo. Desde el municipio de Rosas parte una carretera que conduce a los municipios de La Sierra, La Vega y Almaguer. Al municipio de Bolívar se accede por la vía que parte desde El Bordo en dirección suroeste y comunica los municipios de Bolívar y Santa Rosa, en la zona denominada Bota Cauca.

3.6. UBICACIÓN DE LAS MINAS Y PLANTAS DE BENEFICIO

Las minas y plantas de beneficio visitadas se localizan en el municipio de La Sierra, en las veredas Alto Frontino, Bajo Frontino, Santa Lucía y La Depresión; en el municipio de Almaguer, en la vereda Ruiz (figura 3), y en el municipio de Bolívar, en la vereda Alto Pepinal.

Figura 3.8. Localización de minas, municipio de Bolívar. 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.

Muestra de mano donde se identifica la inclusión de sulfuros dentro de la roca caja. Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano



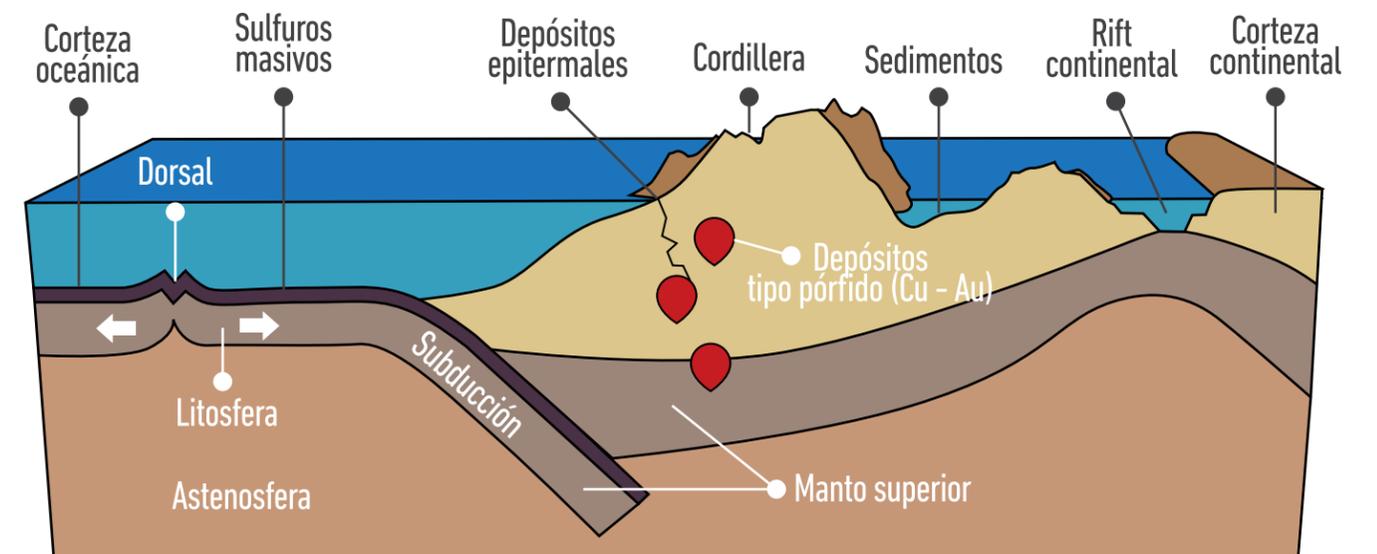
La zona denominada en este documento distrito Mercaderes incluye el área de La Sierra-Almaguer-Bolívar, en el departamento del Cauca, se encuentra geológicamente asociada a un margen tectónico activo donde interactúan las placas tectónicas Suramericana y Nazca. El distrito hace parte de la subprovincia metalogénica de Cauca-Romeral, que se extiende a lo largo del valle interandino Cauca-Patía. Esta zona del sur del país se encuentra limitada al oriente por el sistema de fallas de Romeral, y al occidente por el sistema de fallas Cauca-Patía.

La mineralización de oro está tectónicamente relacionada con la evolución de un magmatismo calco-alcalino de edad Neógeno, resultante de la fusión parcial de las rocas en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramericana, lo cual generó la formación de magmas calco-alcalinos que ascendieron a zonas superficiales a través de fallas de dirección NE, para conformar cuerpos pequeños porfíricos de composición dacítica y andesítica, que intruyen tanto las rocas metamórficas paleozoicas como los sedimentos neógenos (Aguja Bocanegra, Concha Perdomo y Molano, 2009). Numerosos cuerpos porfíricos hipoabisales afloran en el Macizo Colombiano y a lo largo de los drenajes del Cauca y el Patía, intruyen basamento de los terrenos de Romeral y Dagua-Diabásico, así como también las secuencias sedimentarias paleógenas correspondientes a las formaciones Mosquera y Esmita (Leal, 2011).

4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES

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 (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:

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



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.

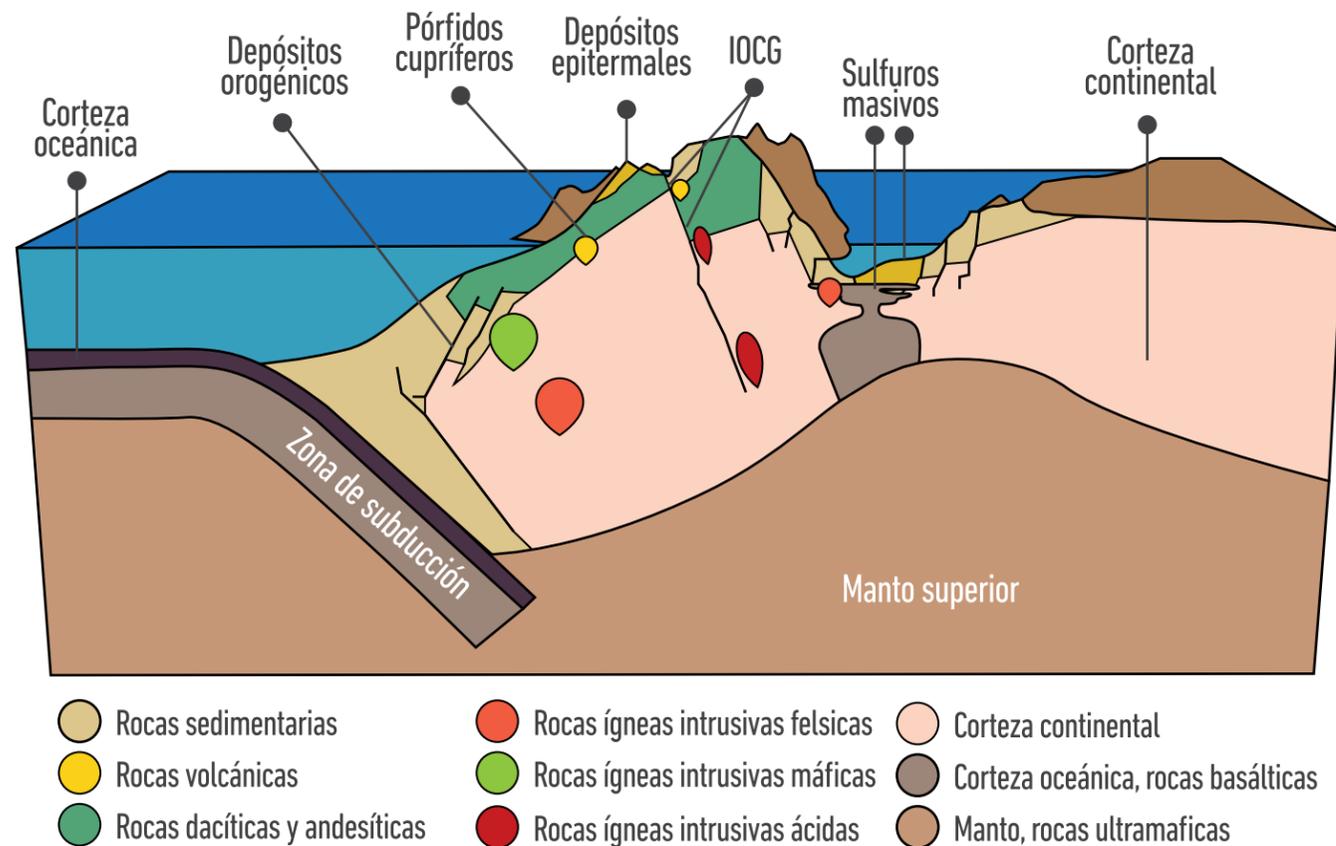
Núcleo. Es la parte interna de la Tierra. Tiene una profundidad de 2900 a 6000 km. Se cree que en la parte interna, el núcleo está formado por minerales metálicos siderófilos, como el níquel y el hierro.

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).



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 donde 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 precipitan en las fracturas y fallas de las rocas encajantes (vetiformes) o en forma de disseminaciones 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 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 H₂S (reducido), mientras que en los de alta sulfuración el azufre se presenta como S⁺⁴, en forma de SO₂ (oxidado). Se pueden destacar a escala mundial, como depósitos epitermales de alta sulfuración, 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 disseminaciones. 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 meso-oceánicas. 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

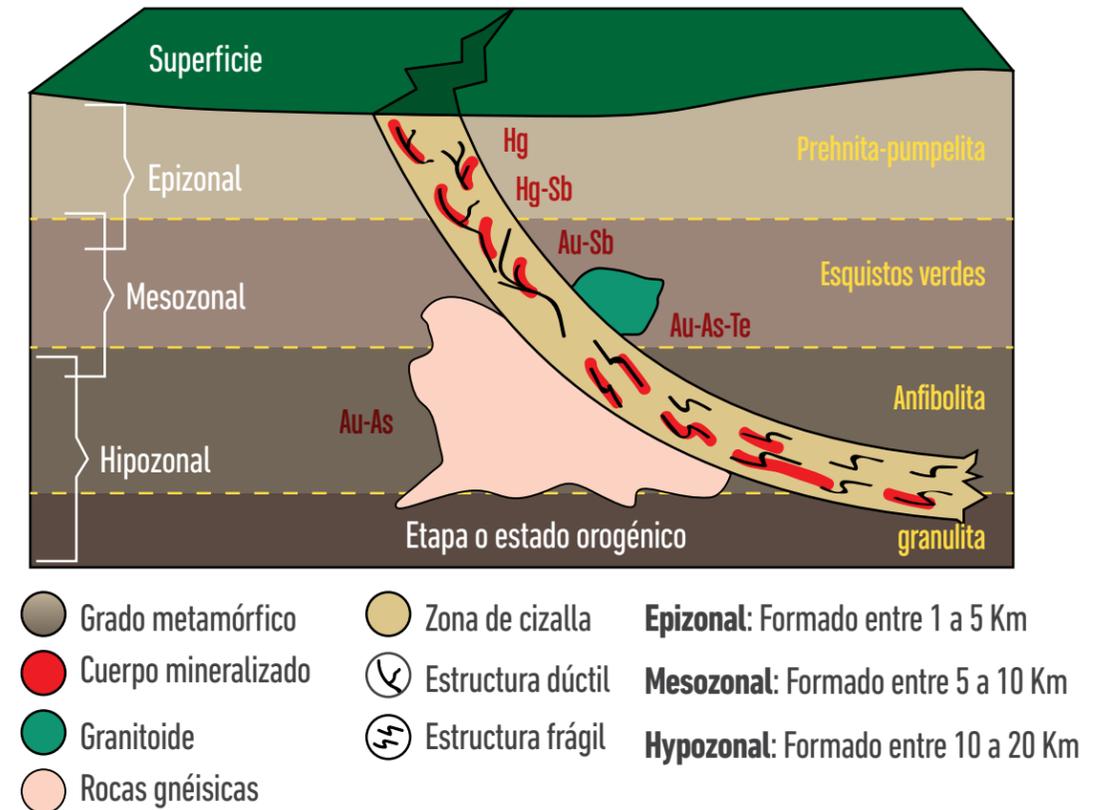
para la acumulación de este tipo de depósitos; actualmente se reconoce la mina del Roble (Chocó) como un depósito de sulfuros masivos, pero igualmente se destacan los prospectos del Dovia (Valle del Cauca) y Anzá (Antioquia).

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



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 (Antioquia), la mina El Vapor (Puerto Berrío, Antioquia) y la zona minera de Segovia (Antioquia), en la cordillera

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



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).

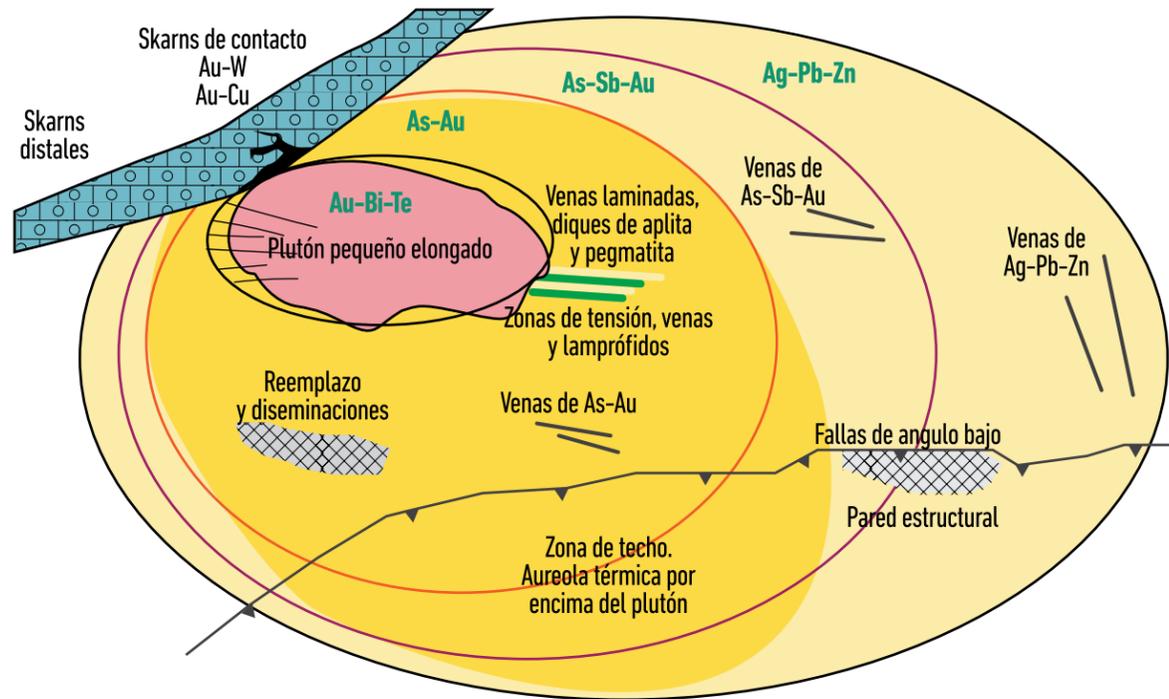
Depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG). Son depósitos auríferos formados en zonas de fractura o de cizalla de gran profundidad, que se producen por circulación de fluidos acuosos hipersalinos (>30% NaCl Eq) de alta temperatura de precipitación (500 °C). Están relacionados con la abundancia de 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 a 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 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.

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



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.

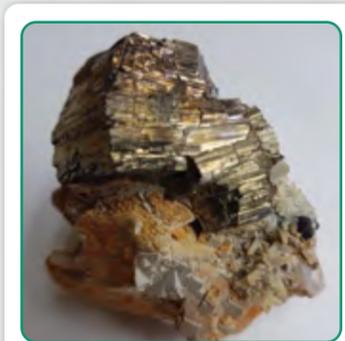
FILÓN

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



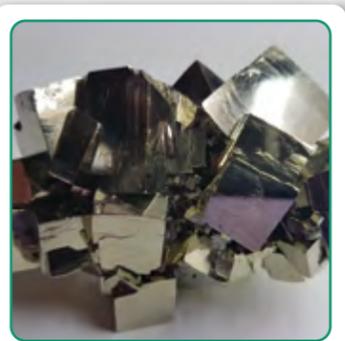
Arsenopirita - Aspy (sulfuro de arsénico)

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.



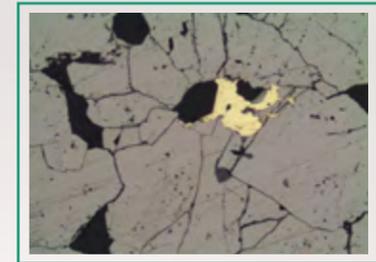
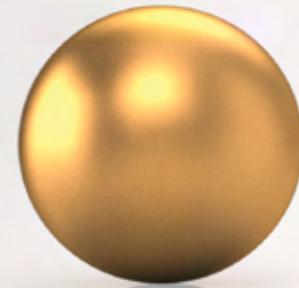
Galena - Gn (mena de plomo)

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

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

OCURRENCIA DE ORO EN LA MENA

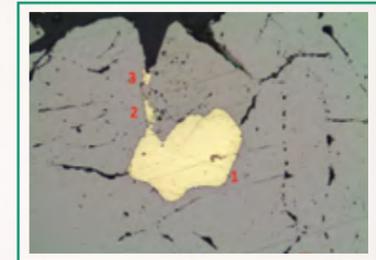
indica la forma, tamaño y estructura como se presenta el oro en la mineralización



Oro asociado a pirita y cuarzo.



Oro libre.



Oro incluido en pirita y rellenando fracturas.



Oro incluido en arsenopirita y libre.

4.2. GEOLOGÍA DEL DISTRITO MINERO DE MERCADERES (CAUCA)

El área denominada en este documento distrito minero de Mercaderes incluye el área de La Sierra-Almaguer y Bolívar, en el departamento del Cauca. Se encuentra geológicamente asociada a un margen tectónico activo donde interactúan las placas tectónicas Suramericana y Nazca. El distrito hace parte de la subprovincia metalogénica de Cauca-Romeral, que se extiende a lo largo del valle interandino Cauca-Patía. Esta zona del sur del país se encuentra limitada al oriente por el sistema de fallas de Romeral y al occidente por el sistema de fallas Cauca-Patía.

La mineralización de oro está tectónicamente relacionada con la evolución de un magmatismo del Neógeno resultante de la fusión parcial de las rocas en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramericana, lo cual generó la formación de magmas calco-alcalinos que ascendieron a zonas superficiales a través de fallas de dirección NE, para conformar cuerpos pequeños porfiríticos de composición dacítica y andesítica, que intruyen tanto las rocas metamórficas paleozoicas, como las rocas sedimentarias neógenas (Aguja Bocanegra et al., 2009; Leal et al., 2011).

4.3. GEOLOGÍA REGIONAL

El basamento está compuesto por rocas metamórficas del tipo esquistos verdes (metabasitas), esquistos negros, metapelitas, metaarenitas, metaconglomerados y metabrechas, que pertenecen al denominado complejo Arquía.

Acrecionado al complejo Arquía, a lo largo del sistema de fallas Cauca Almaguer, se encuentra un conjunto de rocas ultramáficas, diques gabroides y lavas almohadilladas (secuencia ofiolítica) intercaladas con rocas vulcano-sedimentarias denominado complejo Barroso-Amaime, considerado de edad Cretácica (Orrego et al., 1996).

Rocas sedimentarias continentales pertenecientes al Grupo Cauca se depositaron a lo largo del valle del Patía durante el Paleógeno y el Neógeno (Orrego et al., 1996).

Cuerpos magmáticos hipoabisales que se alojan a lo largo de la franja sedimentaria terciaria y en zonas de fractura en el complejo Arquía son los responsables de las mineralizaciones auríferas.

4.3.1. GEOLOGÍA LOCAL

Las características geológicas del área del distrito están estrechamente relacionadas con los contactos entre las rocas del grupo Arquía a lo largo de la zona de falla Cauca-Almaguer y los intrusivos porfiríticos terciarios. Se hace una breve descripción de la situación geológica de cada municipio, por zonas.

4.3.1.1. MUNICIPIO DE LA SIERRA

En el área de estudio se observan rocas metasedimentarias paleozoicas conocidas como complejo Arquía, rocas volcánicas básicas del complejo Barroso-Amaime (KiBa) de edad Cretácica, rocas sedimentarias siliciclásticas de las formaciones Peña Morada (KPgm), Mosquera (Pgm) y Esmita (Nge), y rocas ígneas neógenas asociadas a las fallas principales, que intruyen las rocas más antiguas.

Gran parte del área está cubierta por una capa de flujos, cenizas y flujos volcánicos de la formación Galeón, además de depósitos aluviales y vulcano-sedimentarios cuaternarios (figura 4.7).

Figura 4.6. Mapa geológico generalizado del área. Fuente: modificado a partir de Ingeominas, Planchas geológica 387-Bolívar y 364 Timbío).

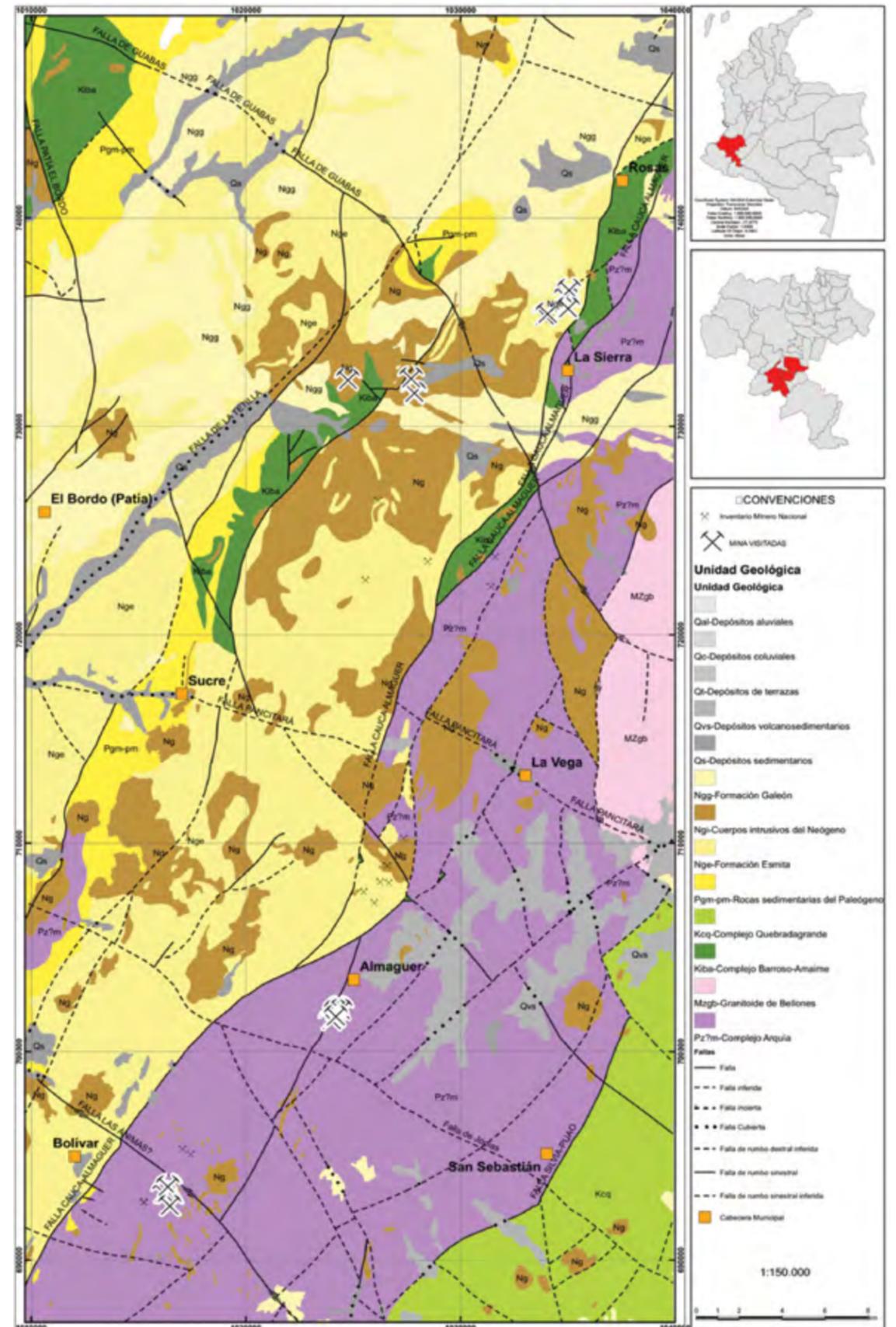
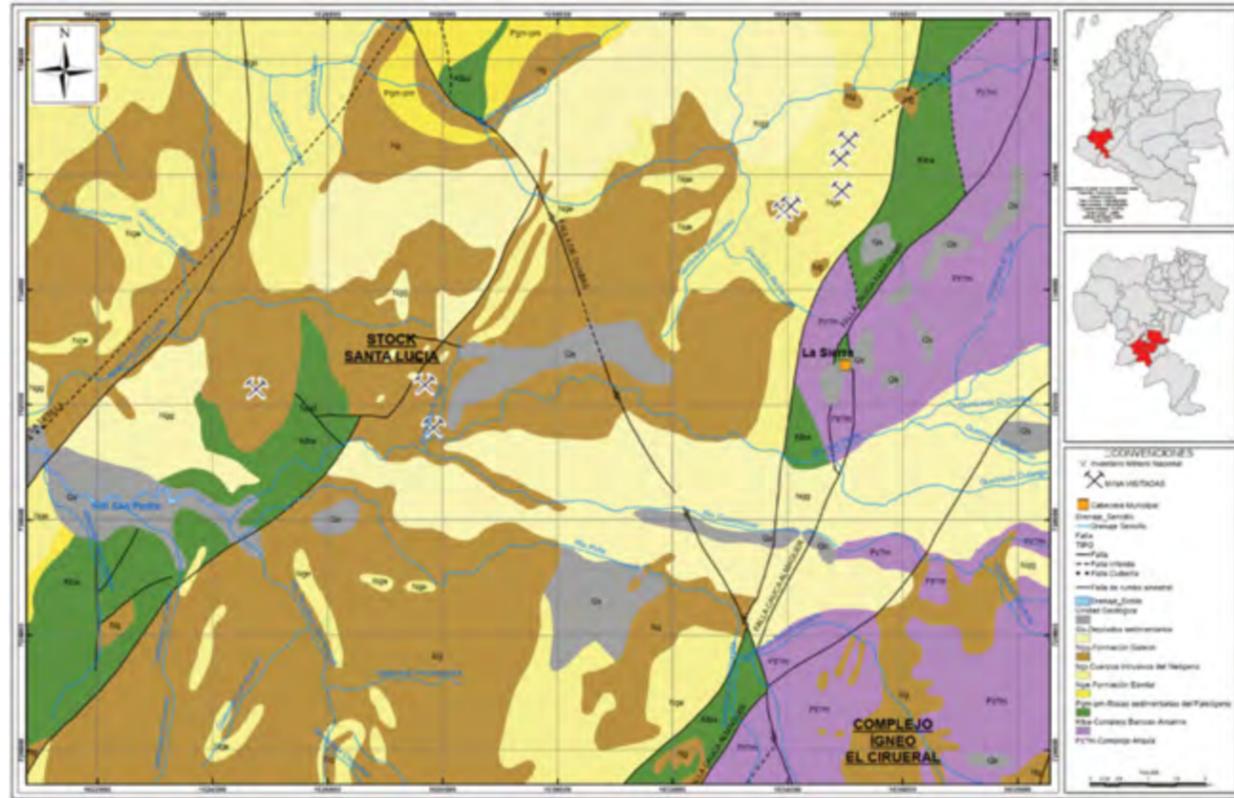


Figura 4.7. Mapa geológico del área de La Sierra. Fuente: modificado a partir de Ingeominas, planchas geológicas 387-Bolívar y 364 Timbío.



4.3.1.2. MUNICIPIO DE ALMAGUER

En los alrededores del municipio afloran esencialmente rocas metasedimentarias del complejo Arquía, y hacia el valle del río Cauca afloran rocas sedimentarias paleógenas y rocas ígneas neógenas asociadas a las fallas principales.

El complejo Arquía consta de rocas metasedimentarias esquistosas del tipo esquistos cuarzo-sericíticos, cloríticos. El área de las explotaciones mineras está dominada por esquistos carbonosos y grafitosos (figura 4.8).

Hacia el valle del Patía afloran intrusivos a lo largo de la falla Cauca-Almaguer, como el stock de Yaguana (Ngy), de composición andesítica y dacítica, en la confluencia de los ríos Marmato y San Jorge, lo mismo que en cabeceras de río Blanco.

4.3.1.3. MUNICIPIO DE BOLÍVAR

En alrededores Bolívar afloran rocas metasedimentarias del Complejo Arquía, y hacia el valle del río Cauca afloran rocas sedimentarias paleógenas y rocas ígneas neógenas asociados al sistema de fallas Cauca-Almaguer.

El complejo Arquía, en inmediaciones de Bolívar consta de rocas metasedimentarias como cuarcitas y esquistos tanto cuarzo-sericíticos como cloríticos. Los cuales son intruidos por numerosos cuerpos magmáticos tonalíticos y calco-alcalinos.

Entre las rocas ígneas aflorantes son comunes intrusivos dentro de los que sobresalen el stock cerro Gordo-La Esperanza (ngge), cuerpos separados por 12 km, que intruyen rocas del Complejo Arquía al occidente de la Falla Cauca-Almaguer. El intrusivo de cerro Gordo exhibe rocas de color gris claro a blanco con texturas porfíricas, es de composición cuarzodiorítica con cuarzo, feldespatos y minerales máficos. Al sur de cerro gordo se encuentra un pórfido andesítico a diorítico (figura 4.9.)

Hacia el Valle del Patía varios cuerpos intruyen a la Formación Esmita, como el stock de El Cobre al noroccidente de Bolívar, el stock de Hato Viejo, cerca del río Hatoviejo y el stock Zarzal Guineal, en el cerro del mismo nombre.

Figura 4.8. Mapa geológico del área de Almaguer. Fuente: modificado a partir de Ingeominas, Planchas geológicas 387, Bolívar, y 364, Timbío.

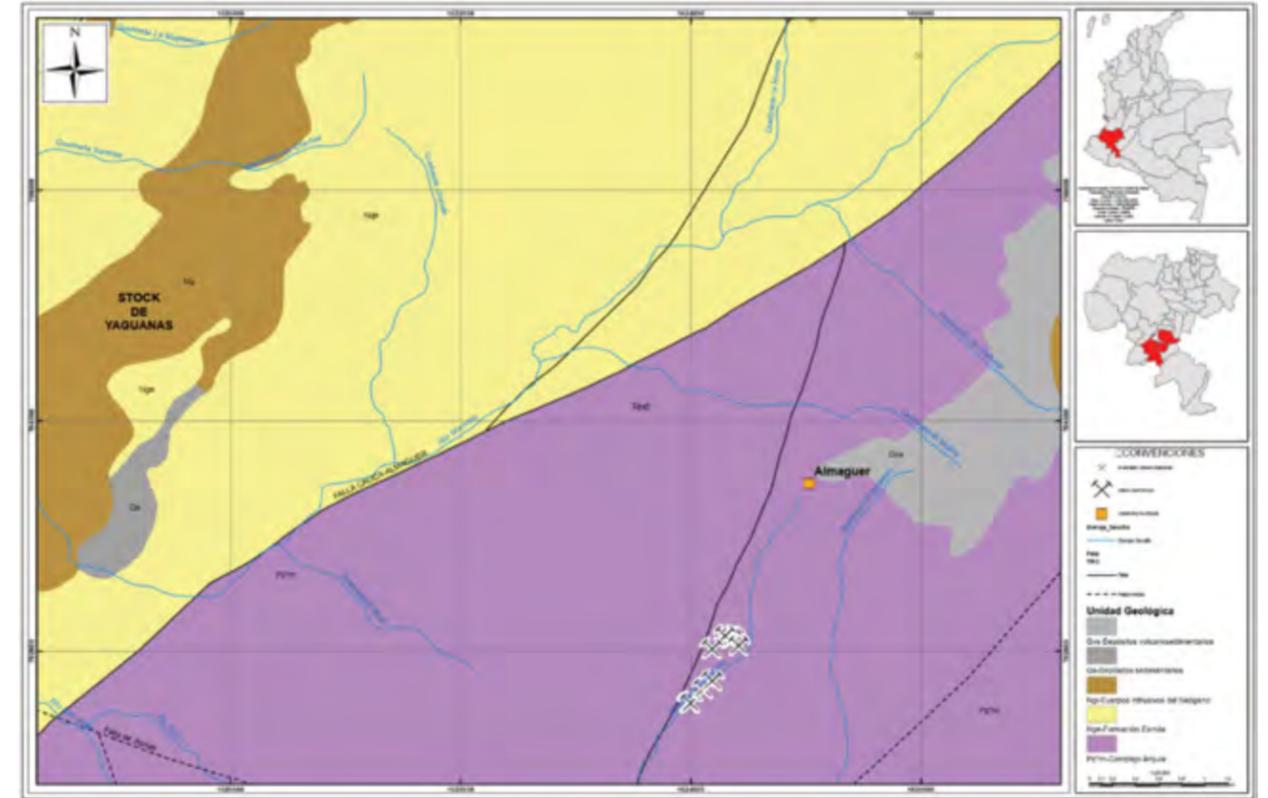
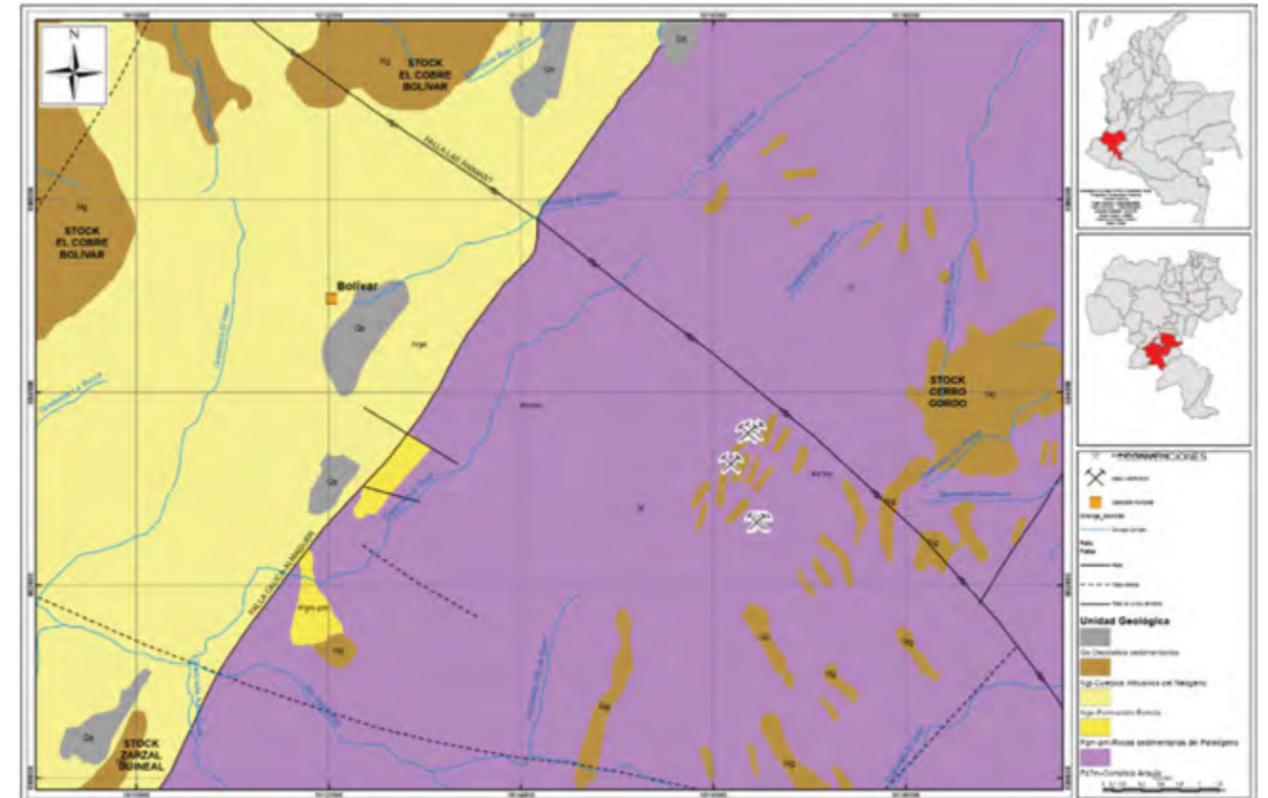


Figura 4.9. Mapa geológico del área de Bolívar. Fuente: modificado a partir de Ingeominas, Planchas geológicas 387, Bolívar, y 364, Timbío.



4.3.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La disposición estructural del área está dominada por dos sistemas de fallas regionales principales. El sistema NE corresponde a fallas subparalelas con dirección NE, al cual pertenecen los sistemas de fallas de Romeral, la falla de Mosquerillo, falla Guanabanal y, más al occidente, el sistema de fallas de Cali-Patía. El segundo sistema presenta dirección general NW con componentes de fallamientos inversos y desplazamientos laterales deslizantes de tipo sinistral, principalmente. Las estructuras regionales más representativas del área corresponden a las fallas de Guabas, Pancitará, Las Ánimas y Jopias, esta última con componente de movimiento en rumbo tipo dextral. Este sistema corta y desplaza el sistema NE (figura 4.6).

A partir de esta cinemática se infiere que en el área minera visitada existe un sistema transpresivo de cizalla simple de componente sinistral, que genera fallas conjugadas de dirección N30-45E, o sintéticas a la dirección general de las estructuras regionales, siendo esta la principal causa del paralelismo estructural NE, y fallas de dirección N40-80W, correspondientes a las fallas antitéticas del sistema. Localmente se generan zonas de apertura con dirección general N80E, y otras con tendencia general N10°-35°W, lo cual facilita el emplazamiento de cuerpos porfíricos de diferentes áreas alineados en dirección de las estructuras regionales, y a los que se asocian los filones auríferos.

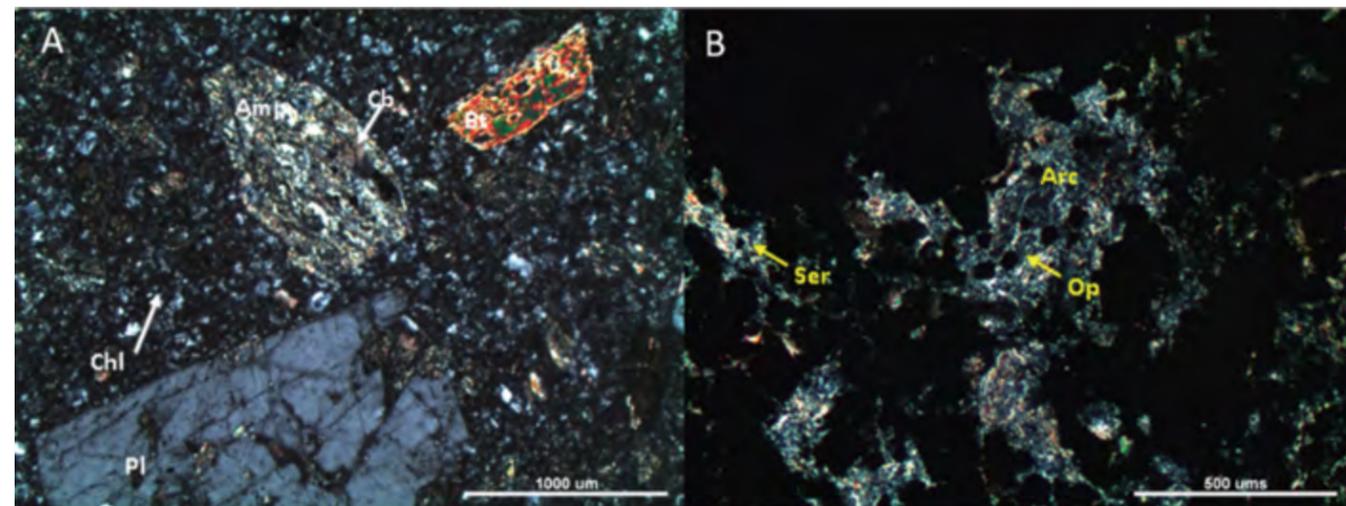
4.3.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal de mayor dispersión afecta principalmente a los cuerpos intrusivos, y está especialmente concentrada en las áreas donde se registra mineralización metálica. Se caracteriza por carbonatización, cloritización y, localmente, por presencia de epidota, para conformar una alteración de tipo propilitico. Cuando se constituyen vetas, estas son de carbonato-cuarzo, y la roca de caja lateralmente presenta carbonatización. La presencia de vetillas de carbonato con esporádica epidota podría indicar ensambles de alteración del tipo propilitico.

La alteración hidrotermal de menor dispersión se restringe a las zonas de veta y respaldos con la asociación cuarzo y/o sílice-sericita-arcillas (illita-moscovita), con intensidad fuerte asociada a arsenopirita-pirita, dentro de las estructuras vetiformes, y con intensidad moderada a débil, hasta 1-2 m al alejarse lateralmente de la zona mineralizada en la roca de caja.

Se han observado diferencias en las zonas mineras de cada municipio. En el área de La Sierra, la alteración hidrotermal se asocia a los intrusivos y las rocas metasedimentarias que conforman la roca de caja. En una andesita porfírica se halló alteración propilitica conformada por el ensamble de clorita (Chl)-epidota-carbonatos (Cb), y en la roca de caja metasedimentaria adyacente, alteración argílica conformada por arcillas (Arg) con sericita (Ser) (fotografía 4.1.). La alteración sericitica se restringe a las estructuras vetiformes. En

Fotografía 4.1. Alteraciones propilitica y argílica en La Sierra (Cauca). A) Socavón La Linda XPL. Aumento: 4x. B) Bocamina El Triunfo XPL. Aumento: 4x. Fuente: autores.



líticos (Li) de la roca de caja y en los respaldos predomina la alteración sericitica representada por la asociación sílice y/o cuarzo (Qz2)-sericita y pirita (Py), y está acompañada de carbonatos (Cb1) en venillas de un evento posterior, y en menor proporción, epidota (fotografía 4.2).

Fotografía 4.2. Alteración hidrotermal sericitica en muestras del socavón mina El Hato, La Sierra (Cauca)-XPL. Aumento: 2x. Fuente: autores.

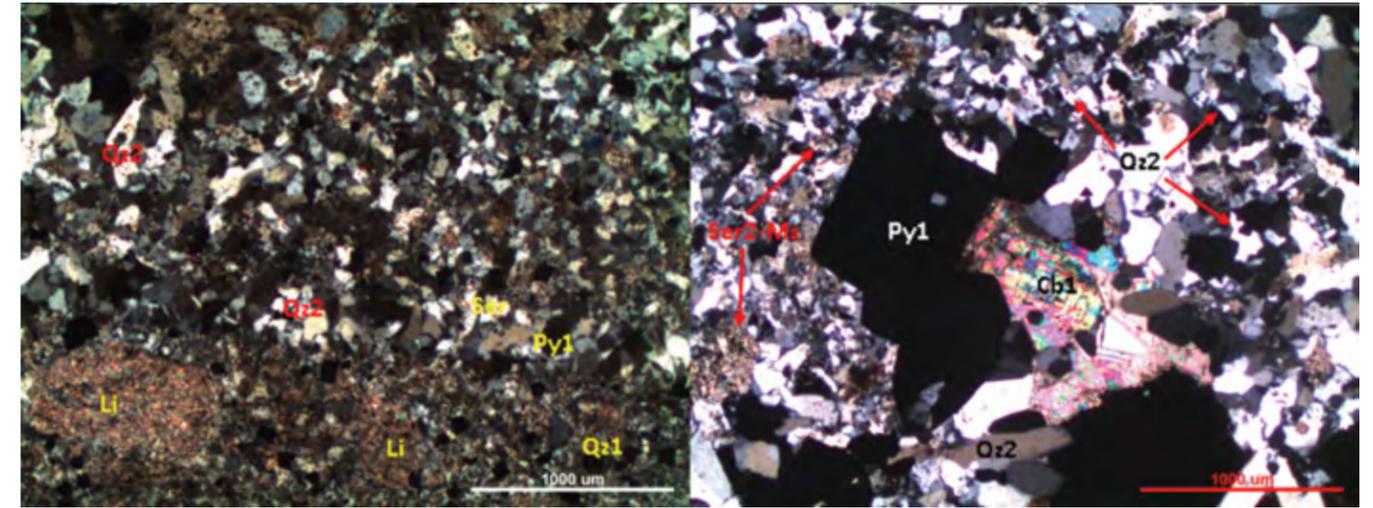
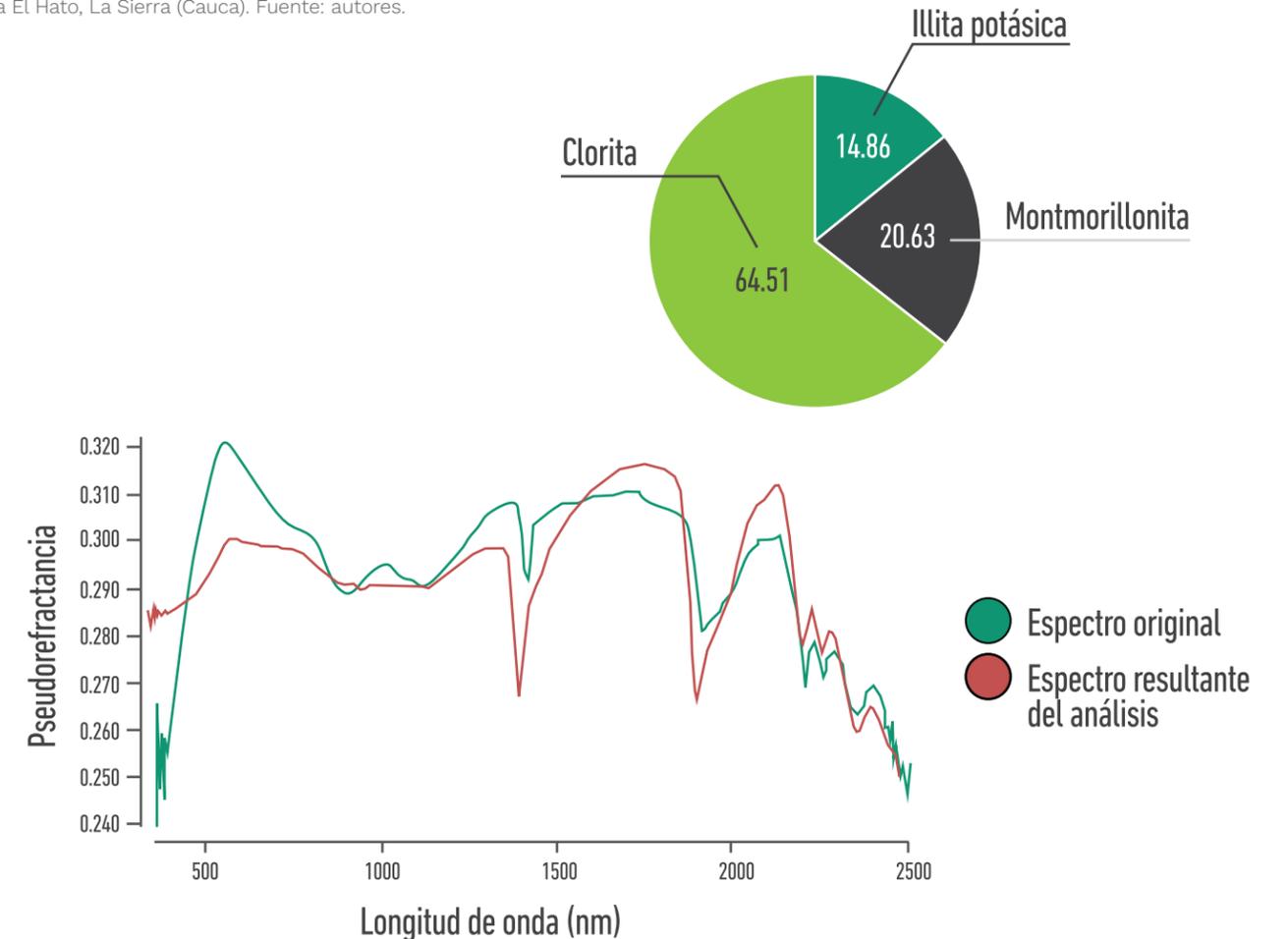
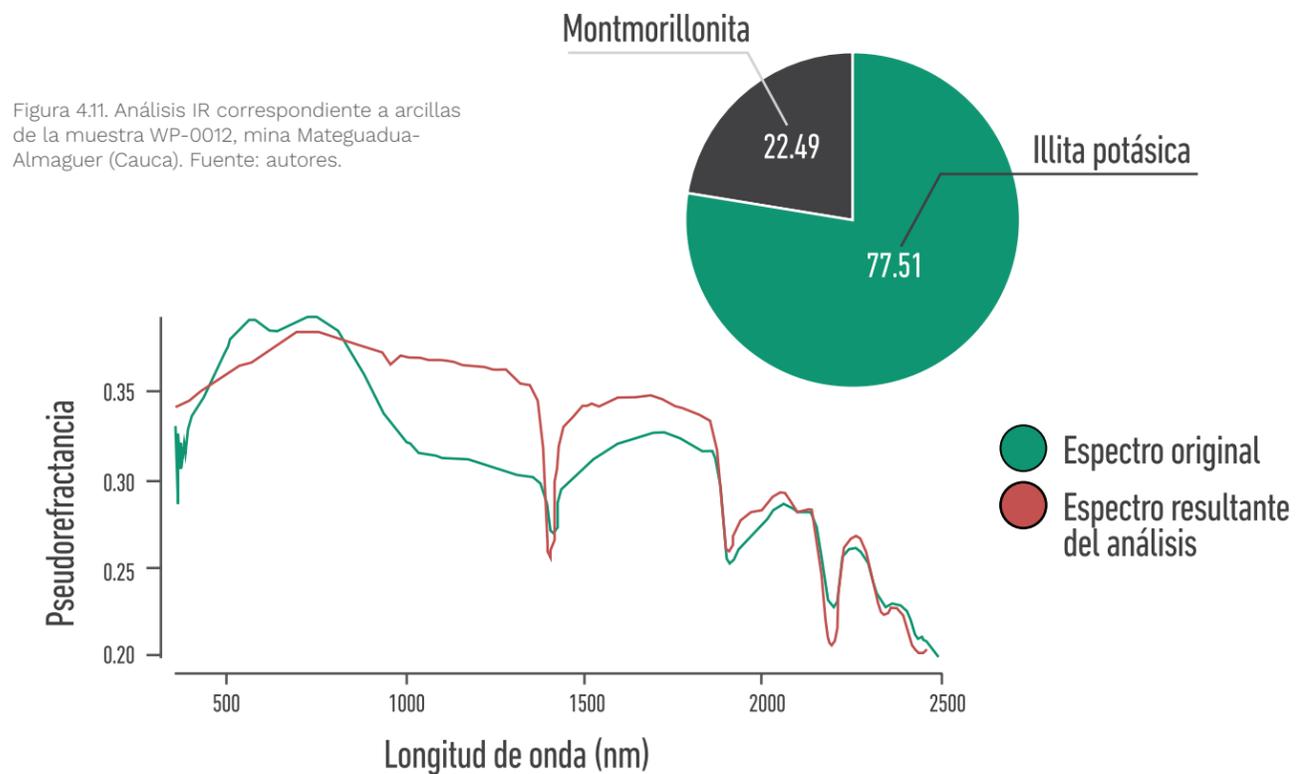
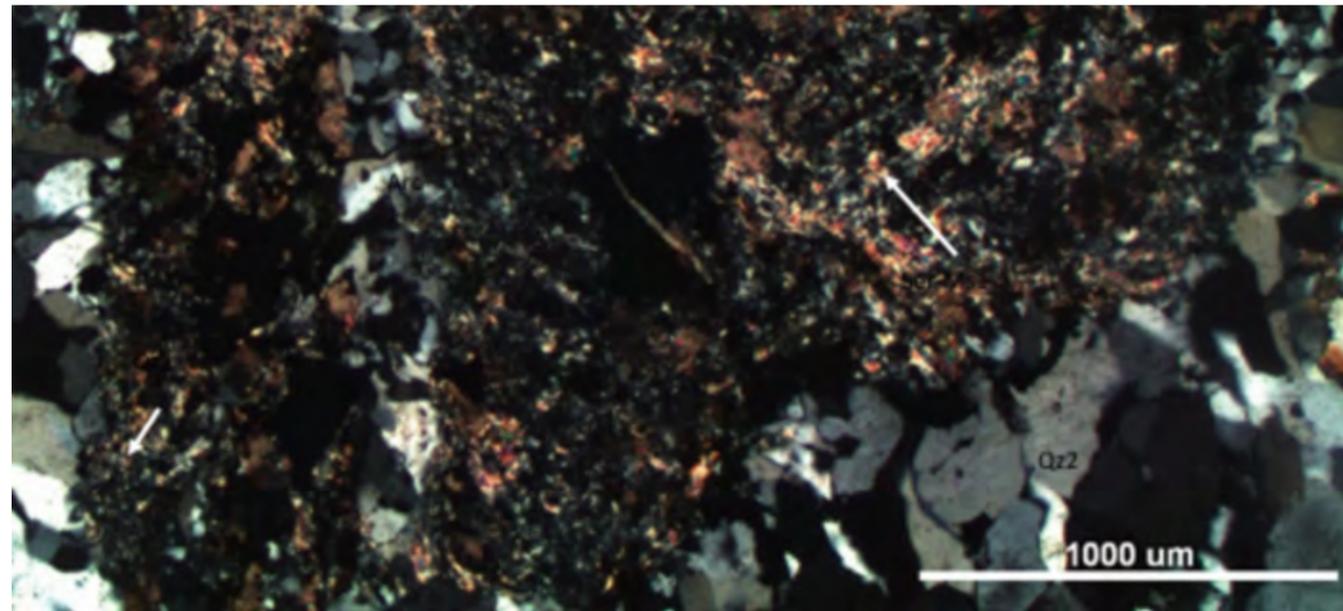


Figura 4.10. Análisis IR correspondiente a arcillas de la muestra ODC-035, mina El Hato, La Sierra (Cauca). Fuente: autores.



En el municipio de Almaguer, la alteración hidrotermal se restringe a las zonas de veta y respaldos con la asociación cuarzo (Qz2) y/o sílice-sericita-moscovita (Ser-Ms1)-arcillas (Arc) illita potásica (véase la figura 4.11.), con intensidad fuerte asociada a arsenopirita-pirita, dentro de las estructuras vetiformes y hasta 1-2 m lateralmente, con intensidad moderada a débil al alejarse de la zona mineralizada en la roca de caja. Cuando se constituyen vetas, estas son de carbonato (Cb1)-cuarzo (QZ1), y la roca de caja lateralmente presenta carbonización. La presencia de vetillas de carbonato con esporádica epidota podría indicar ensambles de alteración del tipo propilítico. En términos generales, las alteraciones se pueden resumir en cuarzo-sericítica alojada en las vetas, carbonización en parches dentro de las estructuras y roca de caja y sericita en venillas (fotografía 4.3).

Fotografía 4.3. Fragmento de roca encajante con la asociación mineral: arcilla-sericita-muscovita-carbonato en parches. XPL. Aumento: 2x. Fuente: autores.



En las minas visitadas de Bolívar se encontró alteración relacionada con los intrusivos porfiríticos que afectaba las rocas de caja inmediatamente adyacentes, principalmente alteración filica representada en la asociación sílice (Si), reemplazando matriz (Mx) y silicatos-sericita (Ser-Ms)-pirita (py), acompañada de carbonatos (cb1) (fotografía 4.4). En algunas la zonas de contacto, el cuerpo intrusivo exhibe ensamblaje caolinita-esmectita (montomorillonita)-illita, correspondiente a alteración argílica, remanente en fragmentos de roca y sobrepuesta por la alteración filica dominante (figura 4.11). En las mineralizaciones vetiformes, por su cercanía a la superficie, predominan alteraciones supergenas asociadas a óxidos e hidróxidos, como hematita y óxidos de hierro criptocristalinos.

Fotografía 4.4. Alteración filica en la mina La Concordia, Bolívar. A: textura macroscópica. B: sección delgada XPL. Aumento: 2x. Fuente: autores.

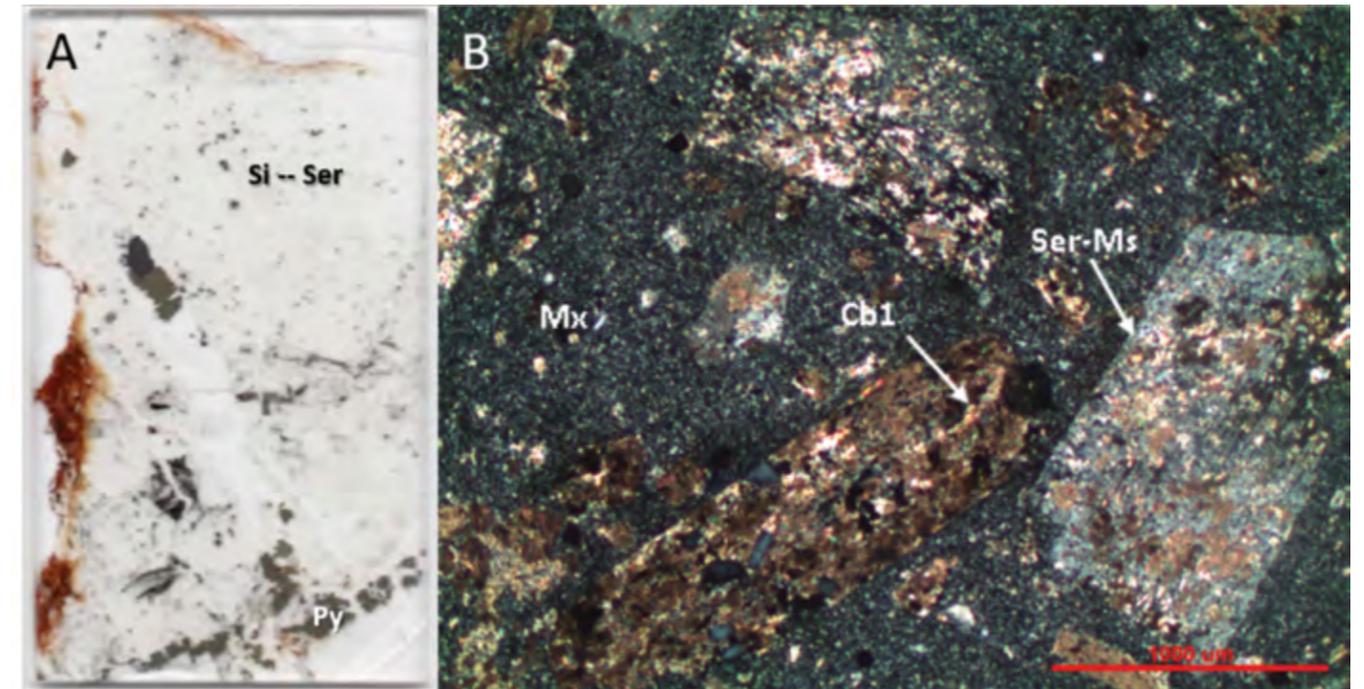


Figura 4.12. Análisis IR correspondiente a arcillas de la muestra WP-0026, mina Concordia, Bolívar (Cauca). Fuente: autores.

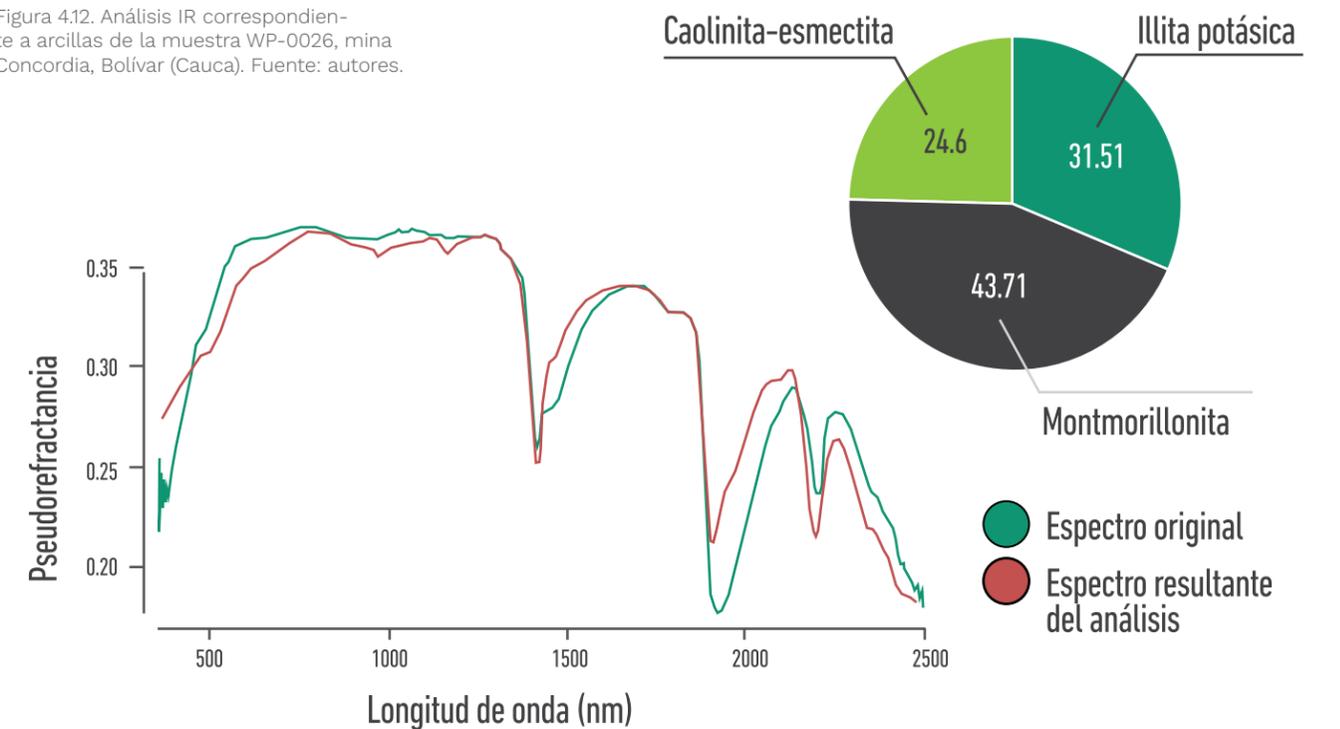
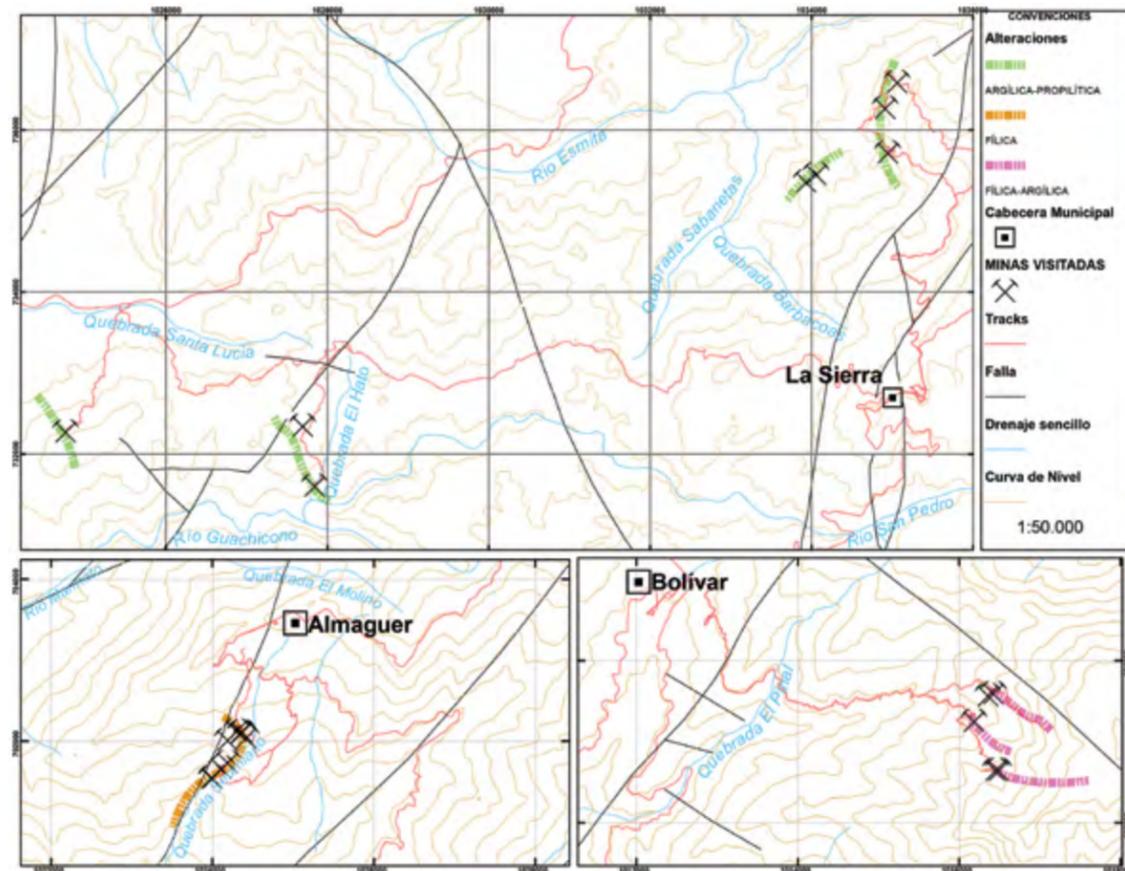


Figura 4.13. Mapa de alteraciones hidrotermales en La Sierra, Almaguer y Bolívar (Cauca). Fuente: autores.



4.3.4. METALOGÉNESIS Y MINERALIZACIÓN AURÍFERA

La zona ha tenido una larga tradición de minería artesanal y ha sido objeto de estudios de exploración minera. Los estudios geológicos adelantados hasta el momento la han delimitado como el distrito minero del Bordo-Patía, en el Mapa metalogénico (SGC, 2016), con presencia de Au Ag_Cu_Pb_Zn_Mo_As_Sb entre Almaguer y La Vega, en prospectos y depósitos epitermales de baja a intermedia sulfuración.

La mineralización de oro está relacionada con el emplazamiento de stocks porfíricos hipoabisales del Mioceno y Plio-Pleistoceno que intruyen rocas metamórficas suprayacidas de manera inconforme por secuencias sedimentarias terciarias. Estas rocas conforman un cinturón magmático de aproximadamente 200 km de longitud, conformado por un conjunto de rocas porfíricas con las que se extiende desde el área de Santander de Quilichao-Buenos Aires-Suárez hacia el sur, hasta el área de La Vega-La Sierra (Leal et al., 2011).

Los estilos de mineralización de oro en el área de la Vega-La Sierra incluyen mineralizaciones tipo pórfido de oro-cobre y mineralizaciones de tipo hidrotermal.

Las mineralizaciones tipo pórfido están asociadas a los intrusivos granodioríticos del Mioceno Medio y Tardío. Estos intruyen el basamento de rocas metasedimentarias y metavolcánicas con afinidad oceánica y edad Cretácea de las unidades Dagua Diabásico y las rocas sedimentarias de afinidad continental de la formación Esmita (París y Marín, 1979; Cediell y Cáceres, 2000; Gómez et al., 2007, en Leal et al., 2011). Ejemplos de mineralizaciones tipo pórfido de oro-cobre (con plata y molibdeno) se encuentran en cerro Bolívar, Betulia, Dominical-Santa Lucía-Piedra Sentada y cerro Gordo.

Los estilos de mineralización epitermales, especialmente relacionados con los de tipo pórfido, representan una importante mineralización de oro con vetas de cuarzo-sulfuro. Como ejemplo se mencionan La Concepción, Dominical y cerro Gordo (Leal et al., 2011).

Las evidencias epitermales son las vetas de cuarzo +sulfuro de baja temperatura que presentan texturas de relleno en espacios abiertos, como masiva, crustiforme, coliforme, brechas, texturas de peine, moss y zonación en mosaico que se superponen a la mineralización tipo pórfido del sector sur (Leguizamón-Bejarano et al., 2009). La actividad minera reciente corresponde a una explotación superficial de este tipo de depósito que practican los pequeños mineros.

4.3.4.1. MINERALIZACIÓN AURÍFERA EN EL MUNICIPIO DE LA SIERRA

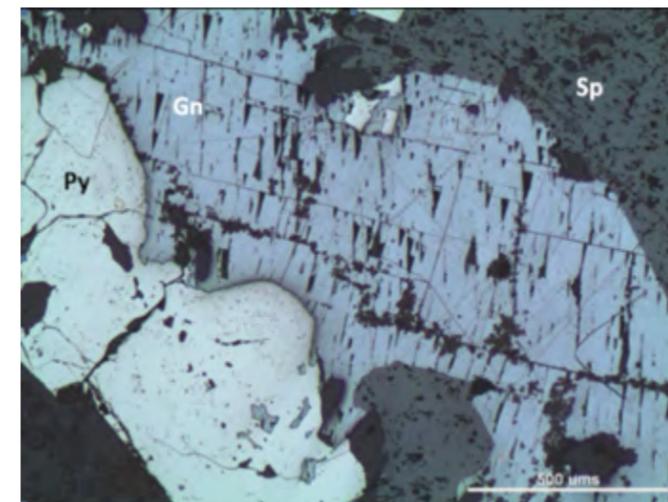
Las minas visitadas, tanto en la vereda El Hato como en la Frontino, tienen minas cuyo contenido mineralógico, aunque variable en proporciones, mantiene una mineralización similar. Las minas están compuestas de cuarzo, carbonato y sulfuros, con predominio de pirita y, en orden de abundancia, esfalerita, galena calcopirita y cantidades menores de arsenopirita y tetraedrita.

En el sector de la vereda Frontino, la roca hospedante es un pórfido andesítico con alteración propilítica, y se encuentra alojada en cercanía de la zona de contacto con rocas sedimentarias.

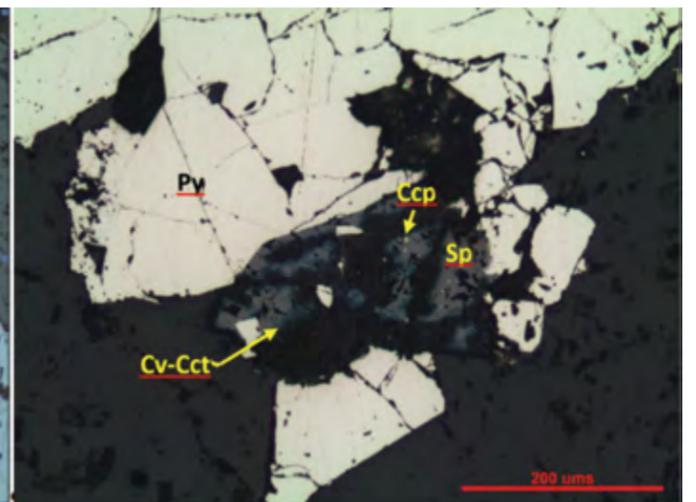
Abundante pirita y cantidades menores de esfalerita, galena y calcopirita constituyen la mena aurífera. Eventualmente se identifican sulfosales de plata, como tetraedrita (fotografías 4.5 y 4.6). La secuencia paragenética indica una mineralización de sulfuros temprana con precipitación Tardía de oro (figura 4.14).

La mena de Frontino se caracteriza por contener mayor cantidad de sulfuros dispuestos en cristales de gran tamaño, mientras que en las minas de El Hato, la mena tiene gran cantidad de óxidos de hierro, debido a que las explotaciones son superficiales.

Fotografía 4.5. Pirita (py), esfalerita (sp) y galena (gn) en agregado masivo, mina La Poderosa. Aumento: 4x. Fuente: autores.



Fotografía 4.6. Pirita y esfalerita asociadas, y oxidación a calcosina-covelina (Cv-Cct). Mina La Esperanza. Aumento: 10x. Fuente: autores.

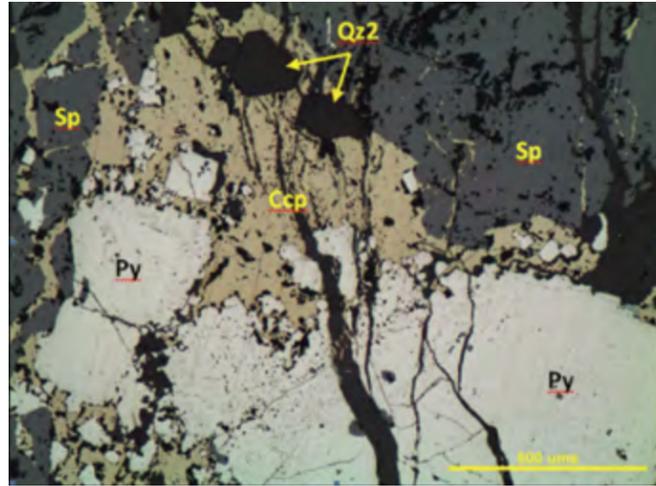


La mineralización aurífera en la vereda El Hato corresponde con zonas de cizalla dentro de pórfidos andesíticos, donde se alojan franjas irregulares de cuarzo y sulfuros como pirita, esfalerita, galena y calcopirita con oro (fotografía 4.7).

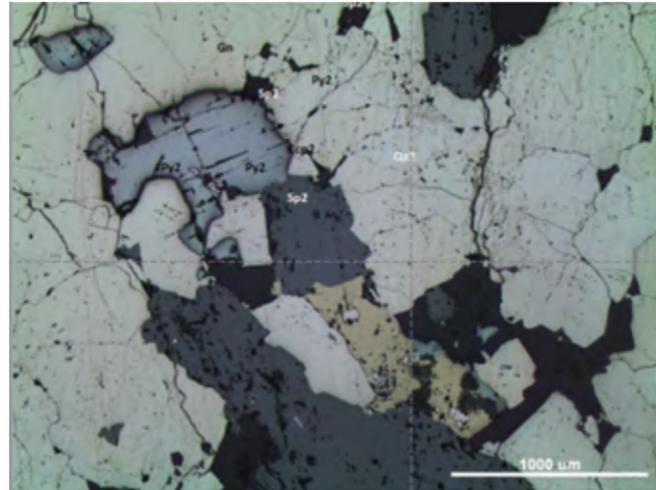
La explotación es predominantemente superficial, con lo cual los sulfuros se encuentran en un alto grado de meteorización a óxidos de hierro, como hematita y goethita.

A diferencia de lo que ocurre en la vereda Frontino, en El Hato se presenta una fase de recristalización de calcopirita acompañada de tetraedrita y esfalerita. La precipitación de oro está relacionada con este último evento de mineralización (fotografía 4.8).

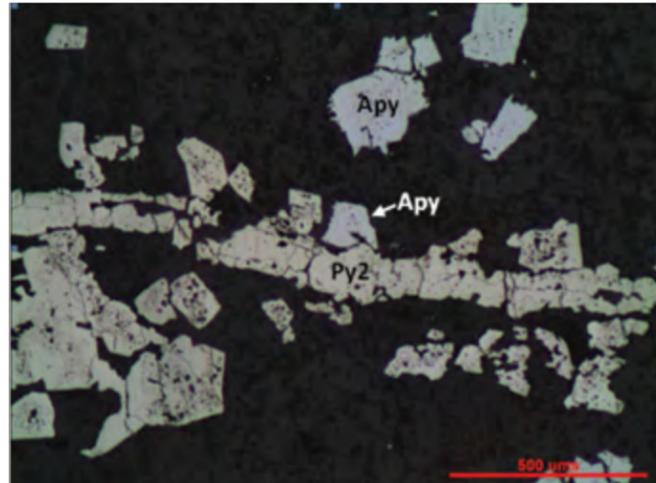
Fotografía 4.7. Recristalización de calcopirita a fracturas de pirita y esfalerita primarias. Mina El Hato. Aumento: 4x. Fuente: autores.



Fotografía 4.8. Pirita asociada a calcopirita, esfalerita y galena. Mina El Hato. Aumento: 2x. Fuente: autores.

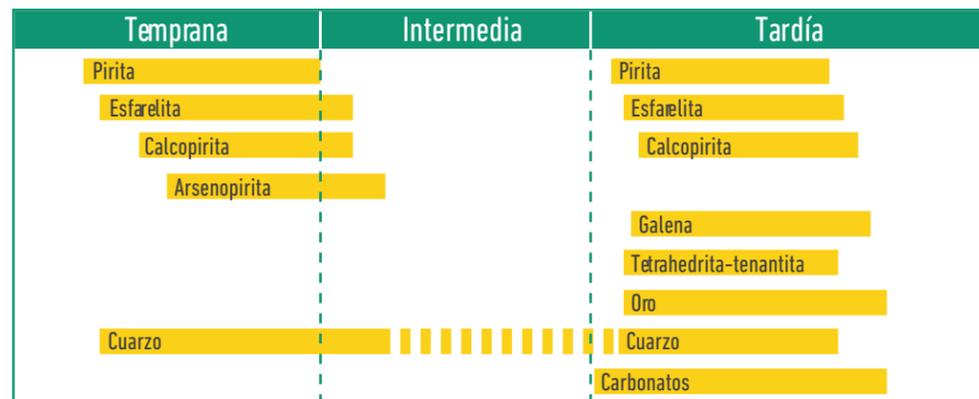


Fotografía 4.9. Vetilla de pirita del segundo evento mineralizante, con arsenopirita. Mina El Hato. Fuente: autores.



La secuencia paragenética establecida para el sector de El Hato considera dos eventos mineralizantes con minerales como pirita, esfalerita, calcopirita y galena. El oro corresponde a un segundo pulso de mineralización, con recristalización de pirita, esfalerita y calcopirita (figura 4.15).

Figura 4.14. Secuencia paragenética generalizada establecida para la zona de El Hato. Fuente: autores.

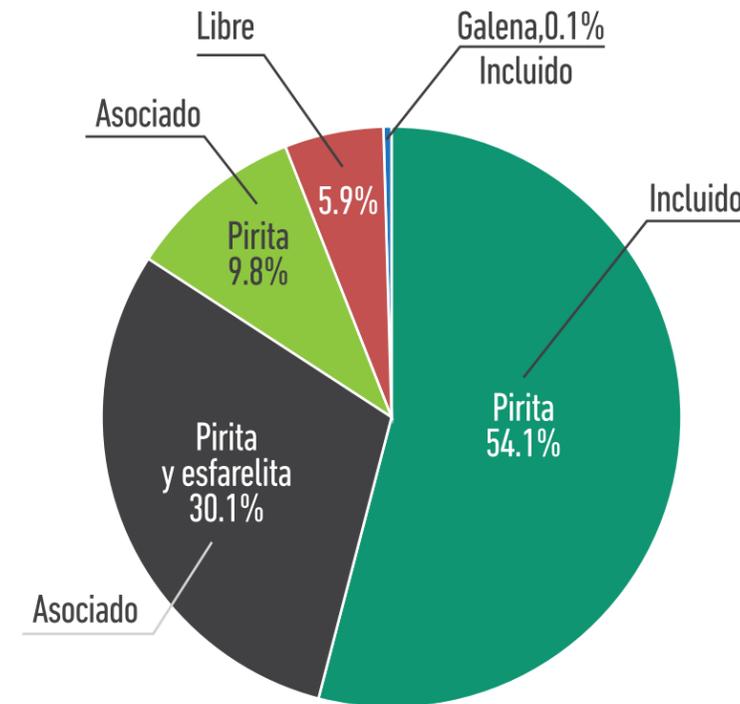


Características del oro en el municipio de La Sierra

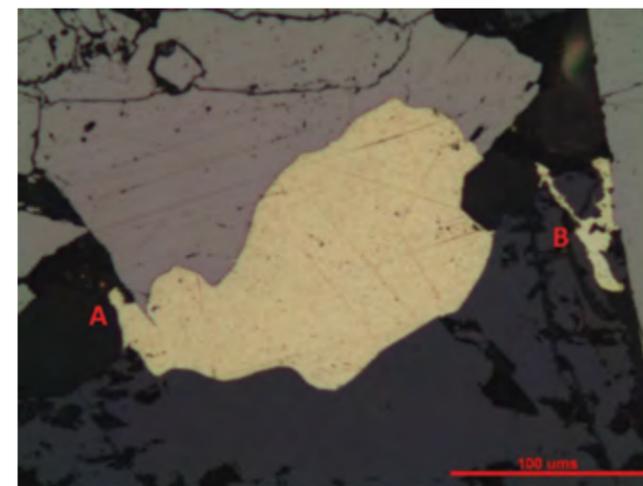
Un total de 35 granos de oro fueron hallados en las secciones petrográficas analizadas. El oro se encuentra principalmente asociado con pirita y con esfalerita (40%). También hay oro libre en cuarzo (6%) y ocasionalmente incluido en galena (figura 4.15; fotografías 4.10 y 4.11). Cabe mencionar que con la cantidad de granos de oro hallados no es posible hacer generalizaciones; si mucho, pueden considerarse una tendencia indicativa.

En contraste con el sector de El Hato, donde el oro se asocia con pirita y esfalerita, en la vereda Frontino se asocia con pirita y galena y el tamaño del oro es mucho menor.

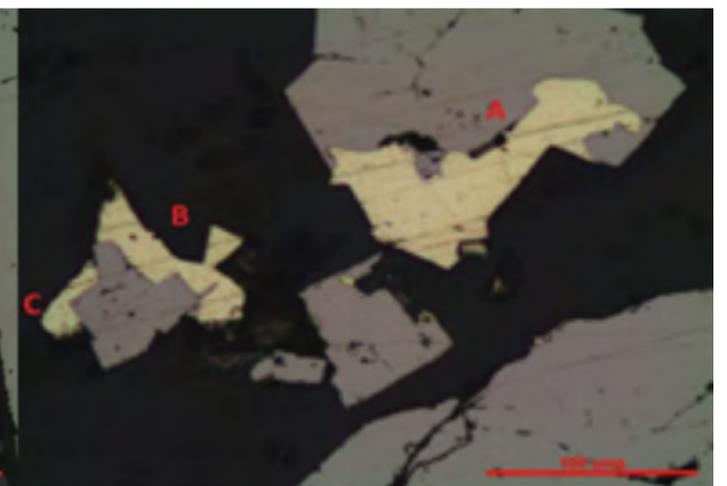
Figura 4.15. Distribución de oro en menas de La Sierra. Fuente: autores.



Fotografía 4.10. Oro asociado a pirita y esfalerita. Mina El Hato. Aumento: 20x. Fuente: autores.



Fotografía 4.11. Oro asociado a pirita y esfalerita. Mina El Hato. Aumento: 20x. Fuente: autores.



La distribución granulométrica del oro se presenta teniendo en cuenta el volumen equivalente de las partículas (D2Eq), expresado en peso. Las partículas de oro encontradas en las muestras colectadas en la vereda El Hato tienen una distribución bimodal: por un lado, hay una población menor de 100 μm , y por otro, algunas partículas son de mayor tamaño, pues superan los 150 μm (figura 4.16). En el sector de la vereda Frontino se hallaron solo siete granos de oro, de menos de 50 micrómetros (figura 4.17; fotografías 4.12 y 4.13).

Figura 4.16. Distribución del tamaño de oro en las minas de El Hato. Fuente: autores.

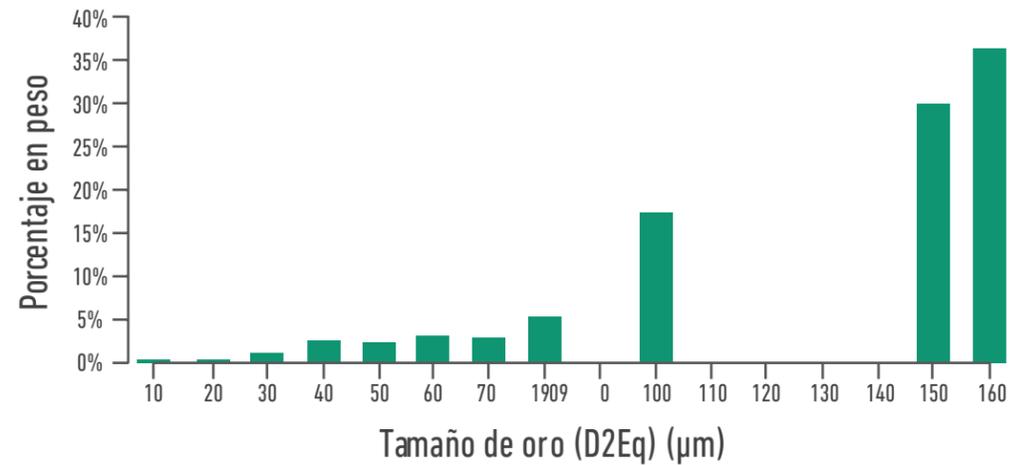
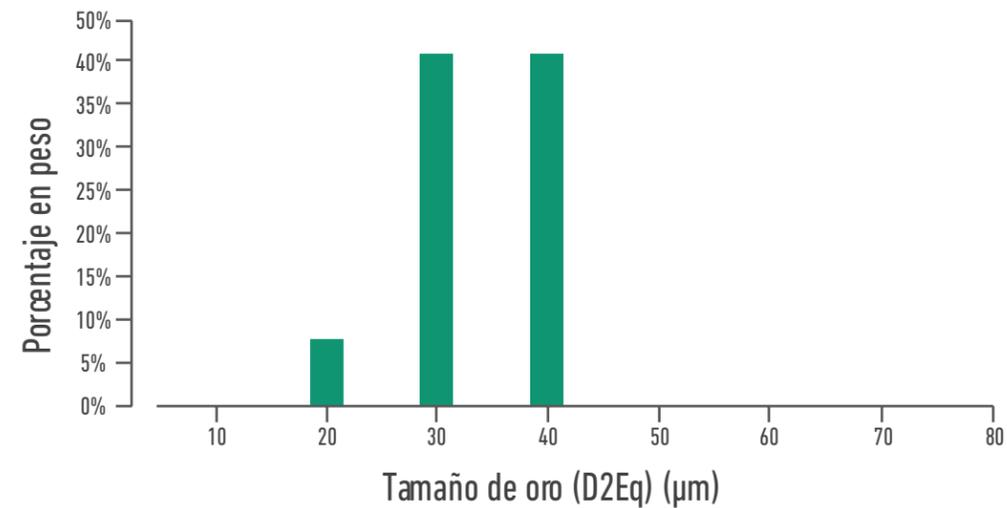


Figura 4.17. Distribución del tamaño de oro en las minas del sector de Frontino. Fuente: autores.

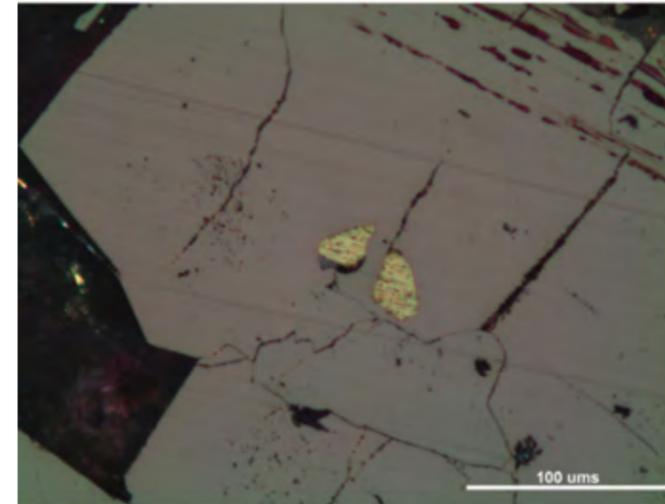


Calidad del oro

Los análisis con microsonda electrónica (EPMA) de las partículas de oro halladas en cuatro minas del sector de La Sierra indican una fineza de oro que oscila entre 73 y 83 wt%, con una tendencia lineal, lo cual sugiere un único pulso mineralizante (figura 4.18). Llama la atención el contenido de Hg, As, Bi y Te en las partículas auríferas, que pone en evidencia la estrecha relación de procesos hidrotermales con soluciones ricas en As y Te. El mercurio contenido en los granos de oro pone de manifiesto el origen primario del mismo. Se han observado también contenidos variables de bismuto en el oro.

La distribución de metales dentro de la partícula de oro es relativamente uniforme, considerando contenidos de Hg, As, Te y Bi (figura 4.19)

Fotografía 4.12. Oro incluido en pirita, mina La Poderosa. Aumento: 20x. Fuente: autores.



Fotografía 4.13. Oro incluido en galena, mina La Poderosa. Aumento: 20x. Fuente: autores.

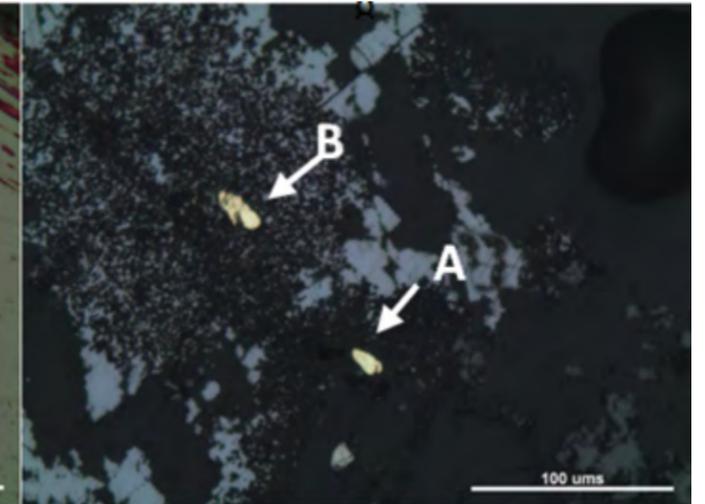


Figura 4.18. Fineza de granos de oro en el sector de La Sierra. Fuente: autores.

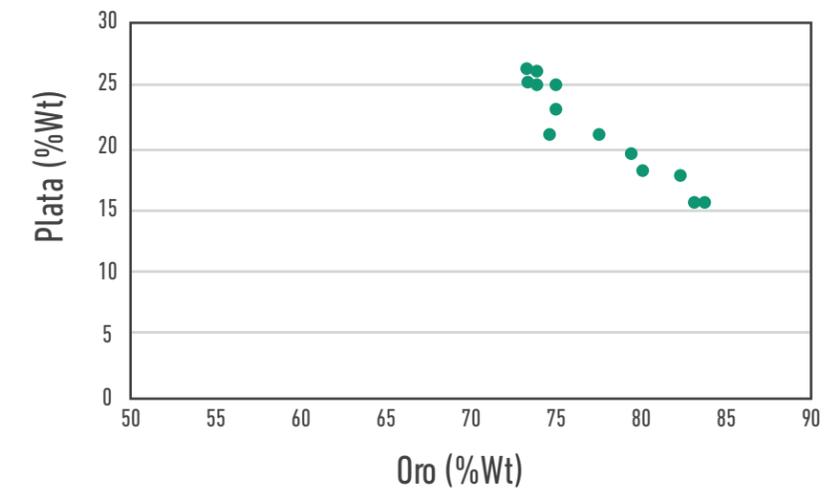
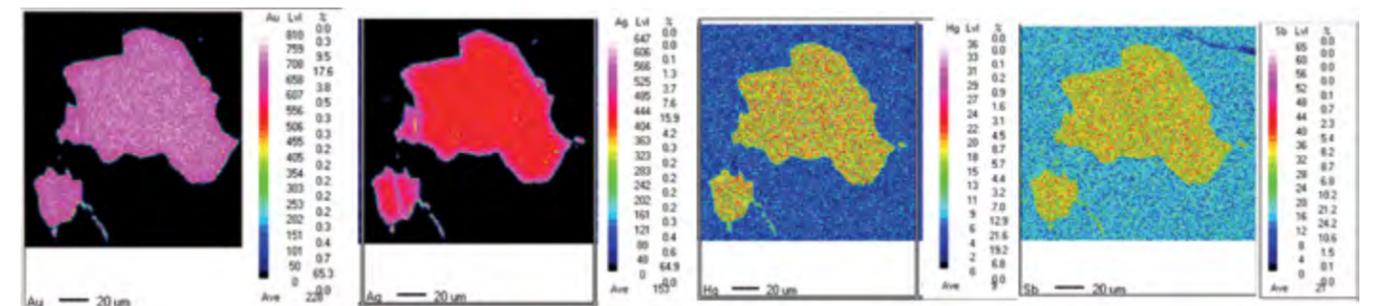


Figura 4.19. Mapas elementales EMPA. Muestra ODC-004 de la mina El Hato. Fuente: autores.



4.3.4.2. MINERALIZACIÓN AURÍFERA EN EL MUNICIPIO DE ALMAGUER

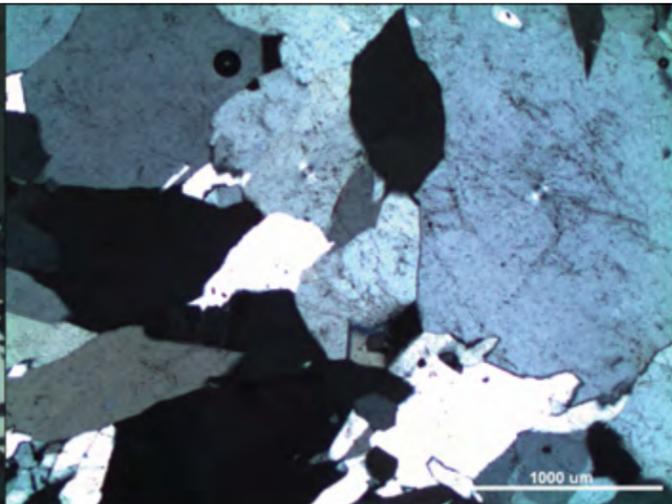
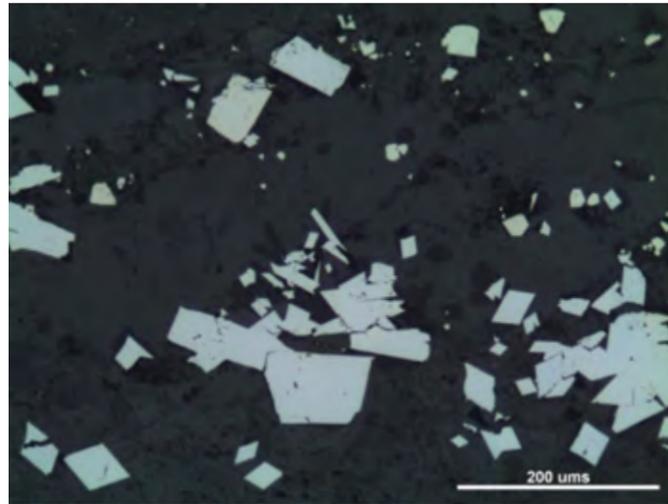
La mineralización aurífera principal corresponde a una zona de cizalla a lo largo de un corredor 30° N-40° W, con sulfuros diseminados, donde predominan pirita y arsenopirita (fotografía 4.14), junto con relleno de espacios en lentes de sílice y cuarzo-carbonatos; acompañan cristales de pirita con distribución diseminada junto con sericita y marcasita. A nivel microscópico fue posible identificar la composición de la veta:

cuarzo-carbonatos con varios eventos de formación cuarzo (Qz2) en vena, cuarzo (Qz3) de recristalización y cuarzo (Qz1) asociado a fragmentos de la roca caja alterados a carbonato (Cb1). También se observa el carbonato (Cb2) recristalizado hacia los bordes a carbonato (Cb3). Vetillas de carbonato (Cb4) que cortan las estructuras previamente mencionadas (fotografías 4.15, 4.16 y 4.17). También hay estructuras subsidiarias más enriquecidas que conforman vetas de cuarzo-carbonato con espesores de 10 a 50 cm, promediando 30 cm, y con bolsas de sulfuros, principalmente pirita, y en menor proporción, calcopirita. Estas estructuras presentan rumbo casi este-oeste (N82°W), buzando 20° a 30° al sureste.

La metalografía realizada a las muestras de los trabajos Mateguadua y Palo Verde logró hallar 24 granos de Au con rangos de tamaño entre 2,3 y 147 μm, y 4,1 a 96,7 μm, respectivamente. En la estructura principal hay presencia de Au libre dentro de cuarzo y Au asociado a pirita, con tamaños finos por debajo de 20 μm. El mineral presenta forma anhedral a subhedral y color dorado. Aunque no se observó en la metalografía, los mineros identifican la presencia de Au asociado a arsenopirita como mena de trabajo; no obstante, la mena contiene gran proporción de arsenopirita (fotografía 4.1). En el caso de Palo Verde, la estructura muestreada es una vena de cuarzo sulfuro de 30 cm de ancho, que presenta mejores tenores (>100 ppm); el Au se halla en cristales anhedral de color dorado brillante, con anisotropía de verde a amarilla. Se encuentran incluidos en pirita, asociados a arsenopirita y galena. La mineralización vetiforme evidencia varios eventos de cuarzo y carbonatos con inclusión de la roca de caja dentro de las estructuras (figura 4.20).

Fotografía 4.14. Cristales euhedrales a subhedrales de arsenopirita (Apy) y pirita (Py). Aumento: 10x. Fuente: autores.

Fotografía 4.15. Vista microscópica de vena conformada por cuarzo 2 (Qz2)-XPL. Aumento: 2x. Fuente: autores.



Fotografía 4.16. Vista microscópica de mena en Almaguer-XPL. Aumento: 2x. Fuente: autores.

Fotografía 4.17. Vista general de mena en Almaguer-XPL. Aumento: 2x. Fuente: autores.

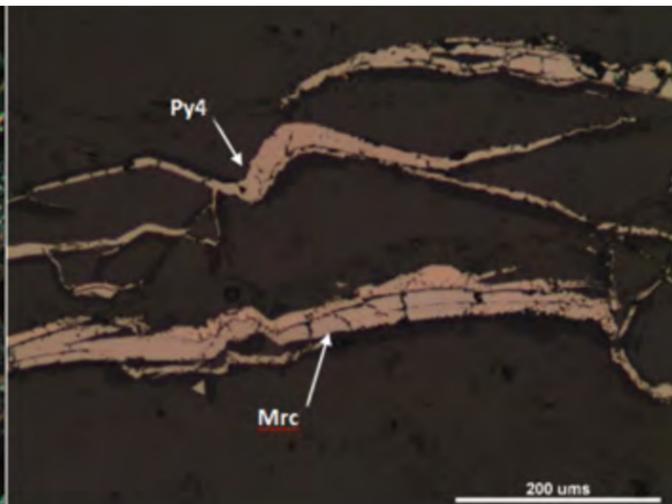
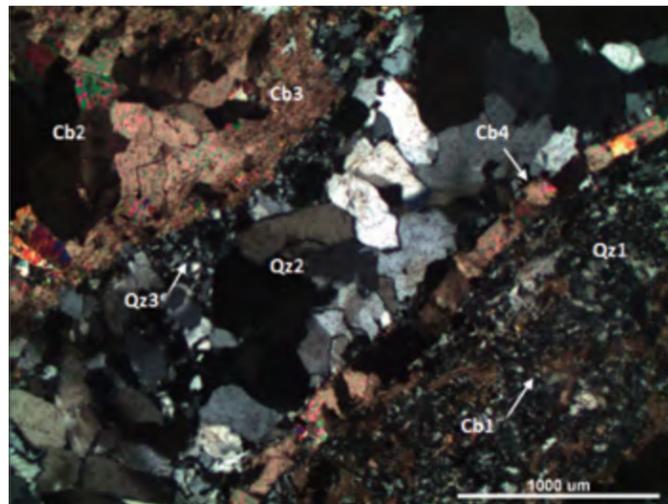
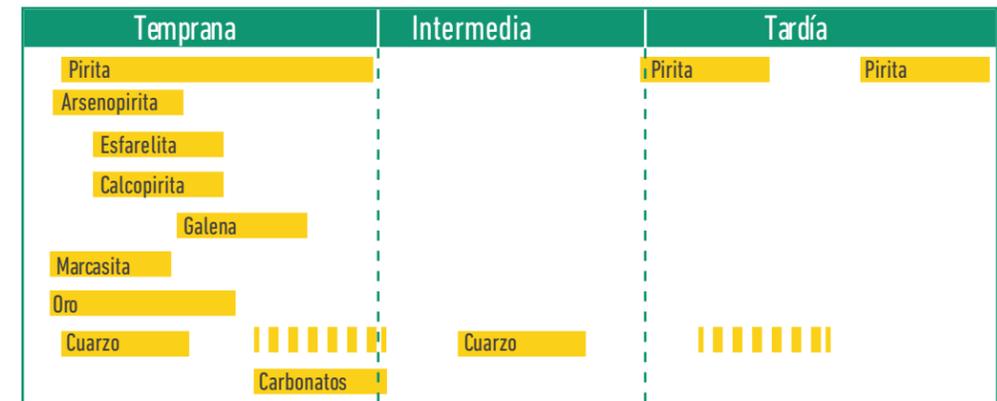


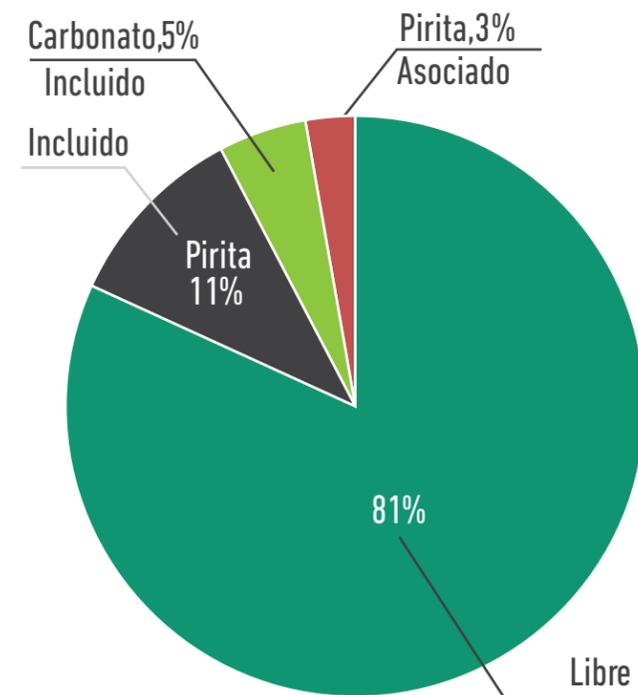
Figura 4.20. Secuencia paragenética generalizada establecida para la zona de Almaguer. Fuente: autores.



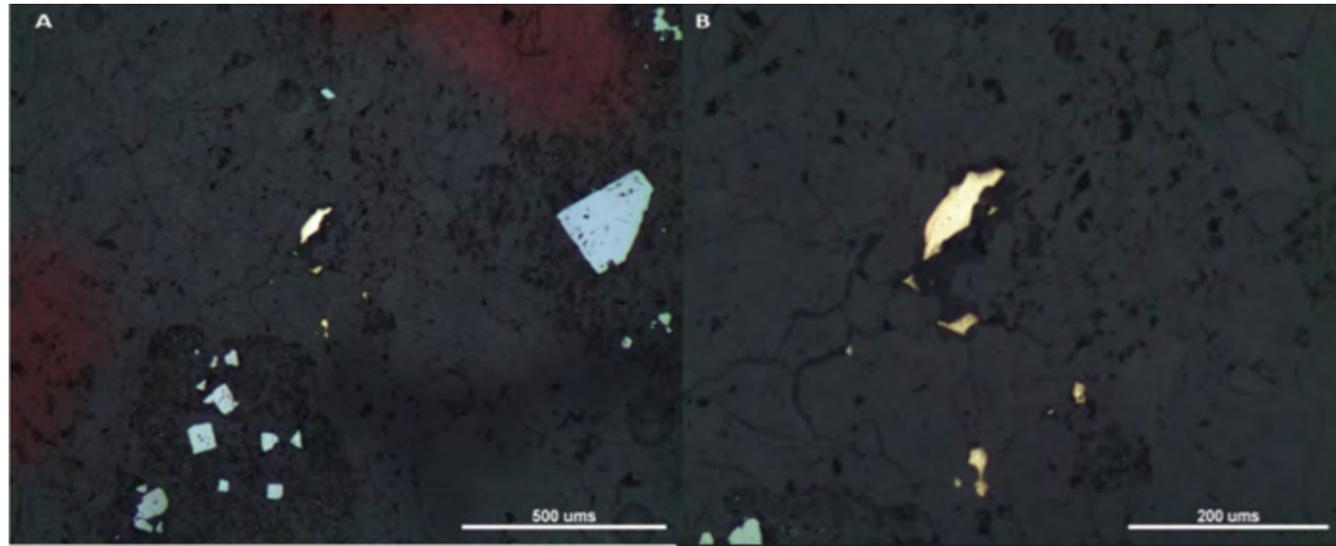
Características del oro del municipio de Almaguer

Un total de 20 granos de oro fueron hallados en las secciones petrográficas analizadas. El oro se encuentra principalmente libre (81%), distribuido entre las partículas de cuarzo. Una pequeña proporción se halló incluida o asociada a pirita (14%), y una porción minoritaria incluida en carbonato (5%) (figura 4.21). Cabe mencionar que con la cantidad de granos de oro hallada no es posible hacer generalizaciones, así que solo se consideran como una tendencia indicativa (fotografías 4.18 y 4.19).

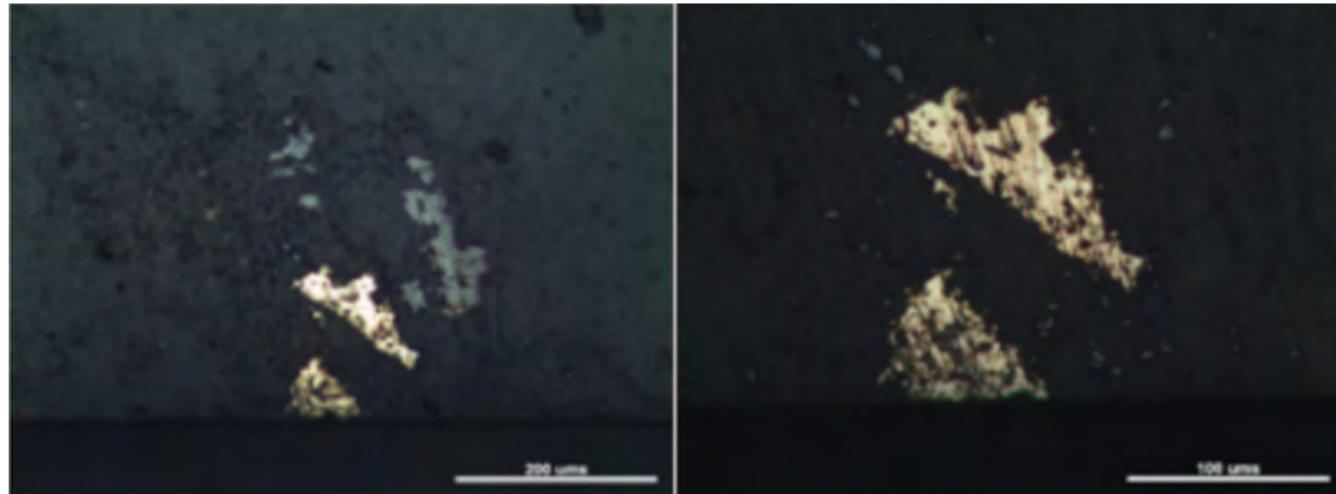
Figura 4.21. Distribución de oro en las menas de Almaguer. Fuente: autores.



Fotografía 4.18. Presencia de oro libre en la muestra WP-0011. A) LRP; cristales de pirita y Au libre; aumento: 4x. B) Detalle de cristal de oro libre dentro de cuarzo, LRP; aumento: 10x. Fuente: autores.



Fotografía 4.19. Cristales anhedrales de oro libre (color dorado) asociados a cuarzo. Aumento: 20x. Fuente: autores.



Las partículas de oro encontradas en las muestras colectadas en la vereda Ruiz corresponden a una población de tamaño menor de 60 µm. En el sector de la vereda Frontino se hallaron solo siete granos de oro de tamaño menor a 50 micrómetros (figura 4.22).

Calidad del oro

Los análisis con microsonda electrónica (EPMA) de las partículas de oro halladas en tres minas del sector de Almaguer indican que hay dos tipos de oro: uno con fineza entre 70 y 75 wt%, tipo electrum característico de las minas Rastra y Mateguadua, y otro cuya fineza oscila entre 87 y 94 wt%, tipo nativo, de la mina Palo Verde (figura 4.23).

En los mapas de elementos se manifiesta que la distribución de plata y oro no es uniforme, lo que puede indicar que hubo varios eventos de removilización de metales; de este mismo modo se manifiesta que hay presencia de mercurio nativo, que se distribuye irregularmente en las partículas de oro, como pasa en la mina Mateguadua (figura 4.24).

Figura 4.22. Distribución del tamaño de oro en la mena de Almaguer. Fuente: autores.

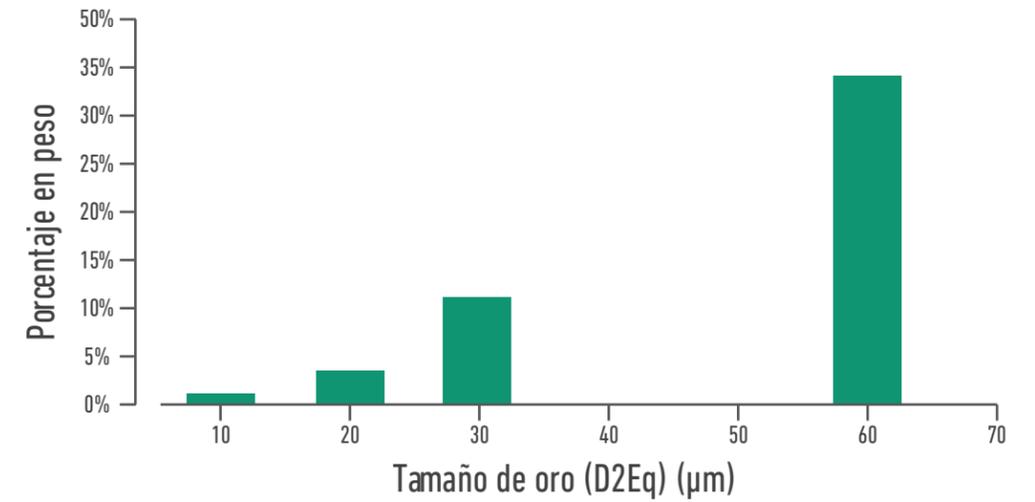


Figura 4.23. Fineza de granos de oro en el sector de Almaguer. Fuente: autores.

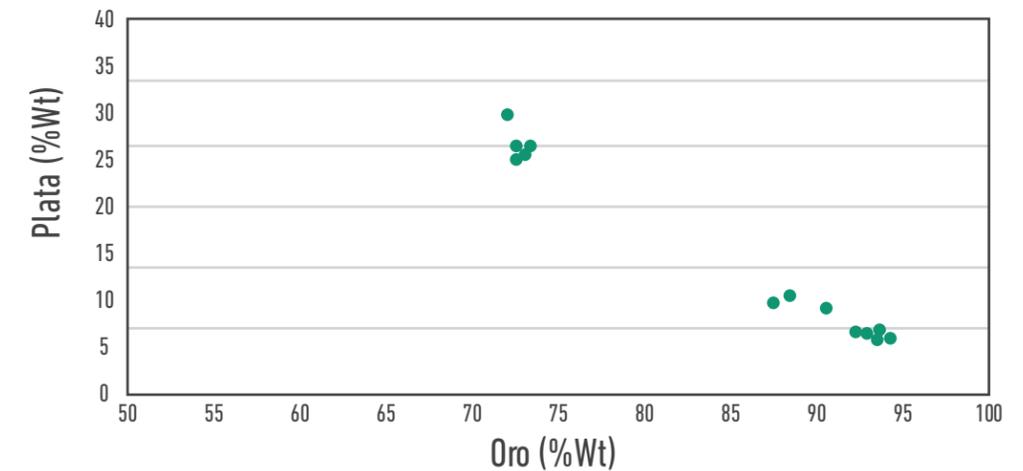
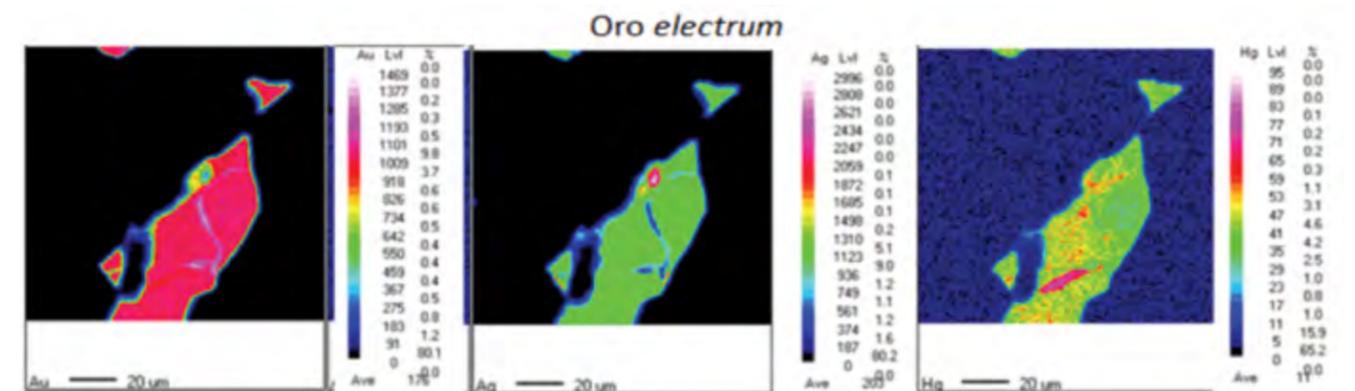


Figura 4.24. Mapa de elementos de granos de Au de la muestra WP-0011. Mina Mateguadua, Almaguer. Fuente: autores.



4.3.4.3. MINERALIZACIÓN AURÍFERA EN EL MUNICIPIO DE BOLÍVAR

Las operaciones mineras de Bolívar, como Concordia, Cooperativa y Aguja de Águila, activas en el momento de la visita, explotan franjas mineralizadas localizadas en las zonas de contacto entre pórfidos dacíticos, esquistos negros y brechas de contacto intrusivas mineralizadas.

La mena aurífera está conformada por pirita (Py1), arsenopirita (Apy), galena (Gn) y esfalerita (Sp) (fotografías 4.20 y 4.21). La secuencia paragenética indica una mineralización temprana de sulfuros polimetálicos con precipitación primaria de oro (figura 4.25).

Fotografía 4.20. Agregados policristalinos de pirita, galena y arsenopirita euhedral en la mina Concordia, muestra-RL. Aumento: 2x. Fuente: autores.

Fotografía 4.21. Agregados de pirita, galena y esfalerita en la mina Concordia, RL. Aumento: 2x. Fuente: autores.

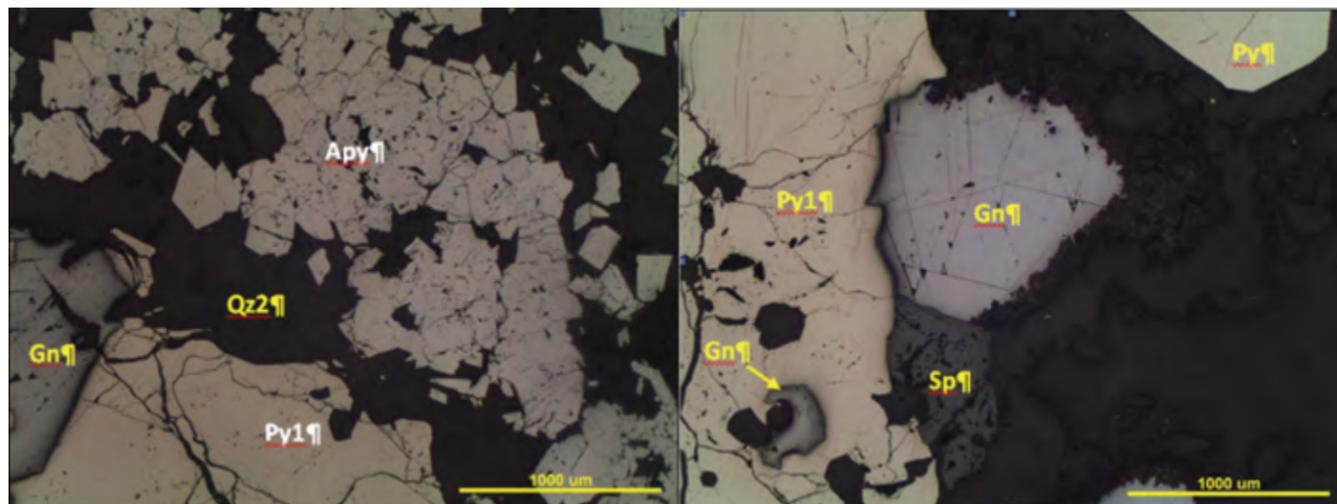
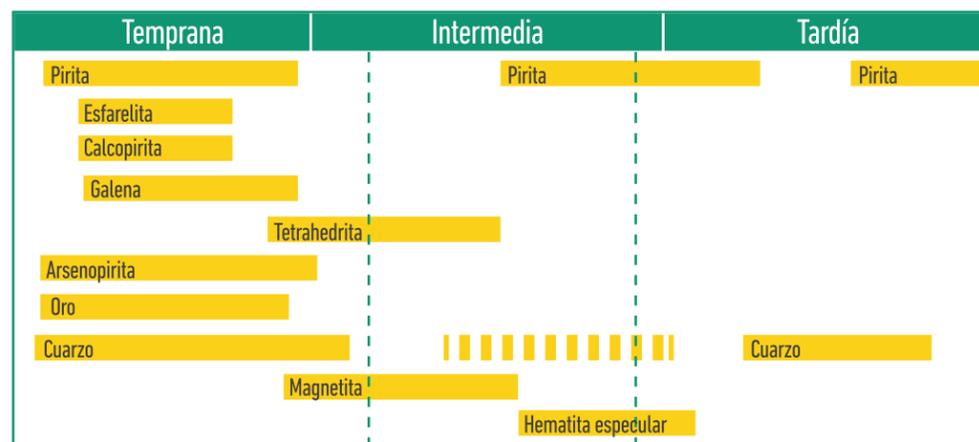


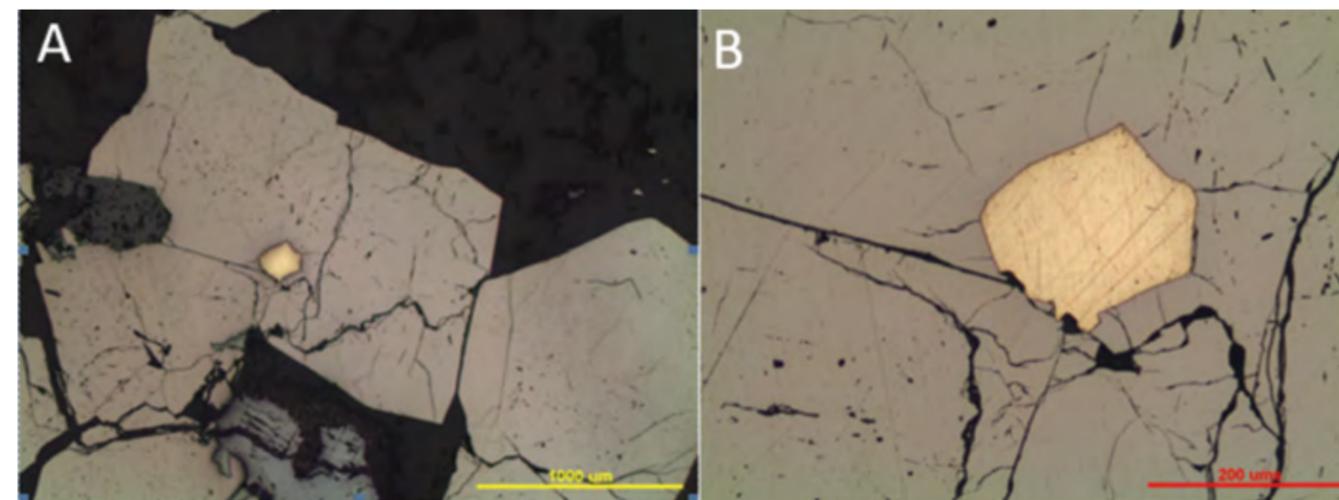
Figura 4.25. Secuencia paragenética generalizada establecida para la zona de la Concordia. Fuente: autores.



Características del oro del municipio de La Sierra

El oro aquí encontrado está relacionado directamente con pirita. Infortunadamente, un solo grano de oro fue hallado incluido en pirita, cuyo diámetro equivalente (D3Eq) mide 186 micrones (fotografía 4.22).

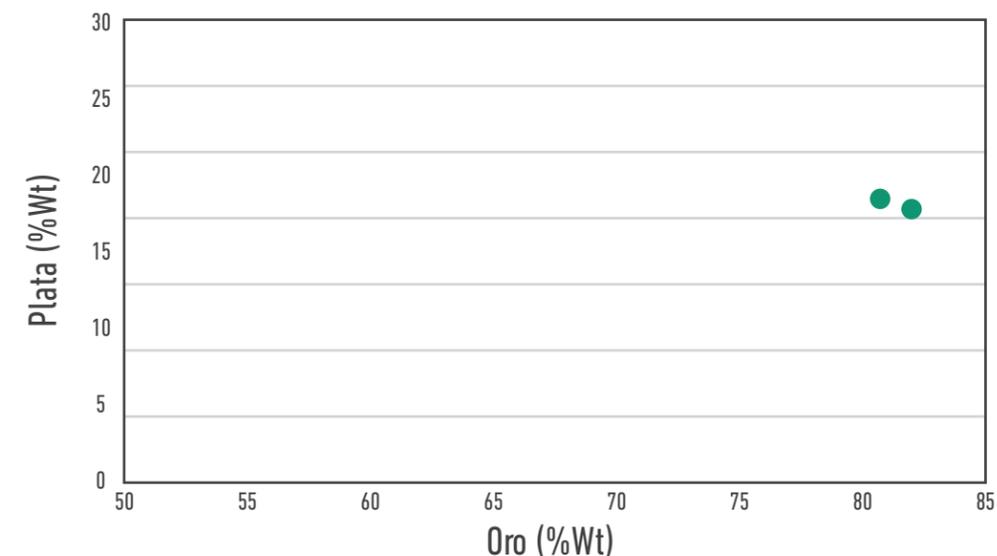
Fotografía 4.22. Oro incluido en pirita. Socavón La Concordia WP-0029-RL. Aumento: 4x. Fuente: autores.



Calidad del oro

Los análisis de EPMA realizados a un único grano de oro indican que se trata de oro nativo con fineza del 80,1 wt%, y plata de 18,3 wt% en los bordes, con un contenido ligeramente mayor de oro en el centro del grano (82,2 wt%). También se detectaron cantidades muy pequeñas de Sb, Te y Bi (figura 4.26).

Figura 4.26. Fineza del oro en grano de Au mina La Concordia, Bolívar. Fuente: autores.



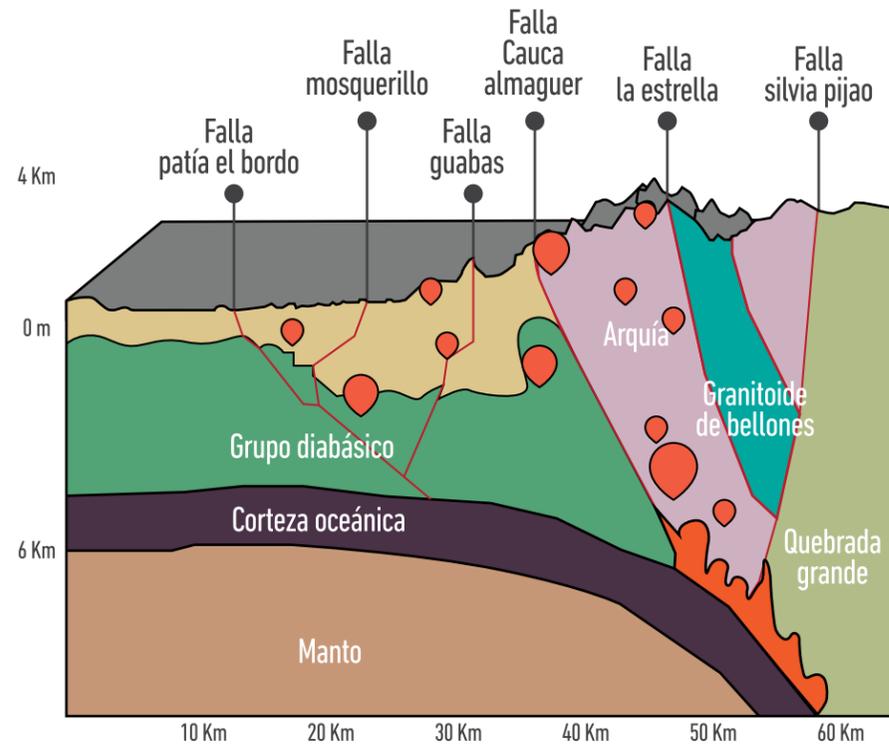
4.3.5. MODELO METALOGÉNICO

La conformación tectónica del norte de Suramérica con las placas de Nazca, Caribe y Suramericana favorece la fusión parcial de rocas en la zona de subducción y la formación de magmas calco-alcalinos que ascienden a través de fallas profundas con dirección NE para conformar cuerpos hipoabisales porfíricos de composición dacítica y andesítica, que intruyen las rocas metasedimentarias paleozoicas del complejo Arquía, volcánicas y sedimentarias cretácicas del complejo Barroso-Amaime y los sedimentos del Neógeno.

Muchos de estos cuerpos magmáticos se encuentran en un ambiente tectónico favorable para la formación de depósitos tipo pórfido, que son potencialmente ricos en cobre y oro. Sobre los cuerpos porfíricos se han

desarrollado procesos hidrotermales que dan lugar a depósitos epitermales de oro con las características descritas en la mayoría de las minas visitadas.

Figura 4.27. Modelo genético generalizado del distrito de El Bordo-Patía. Fuente: autores.



4.3.6. UNIDADES GEOMETALÚRGICAS (UGM)

Considerando que el conjunto de propiedades mineralógicas, texturales, físicas y químicas de un yacimiento que repercuten sobre el tratamiento metalúrgico representa una unidad geometalúrgica (UGM), cada tendencia o grupo de minas descrito con anterioridad puede representar una unidad geometalúrgica, que puede definir una ruta metalúrgica específica.

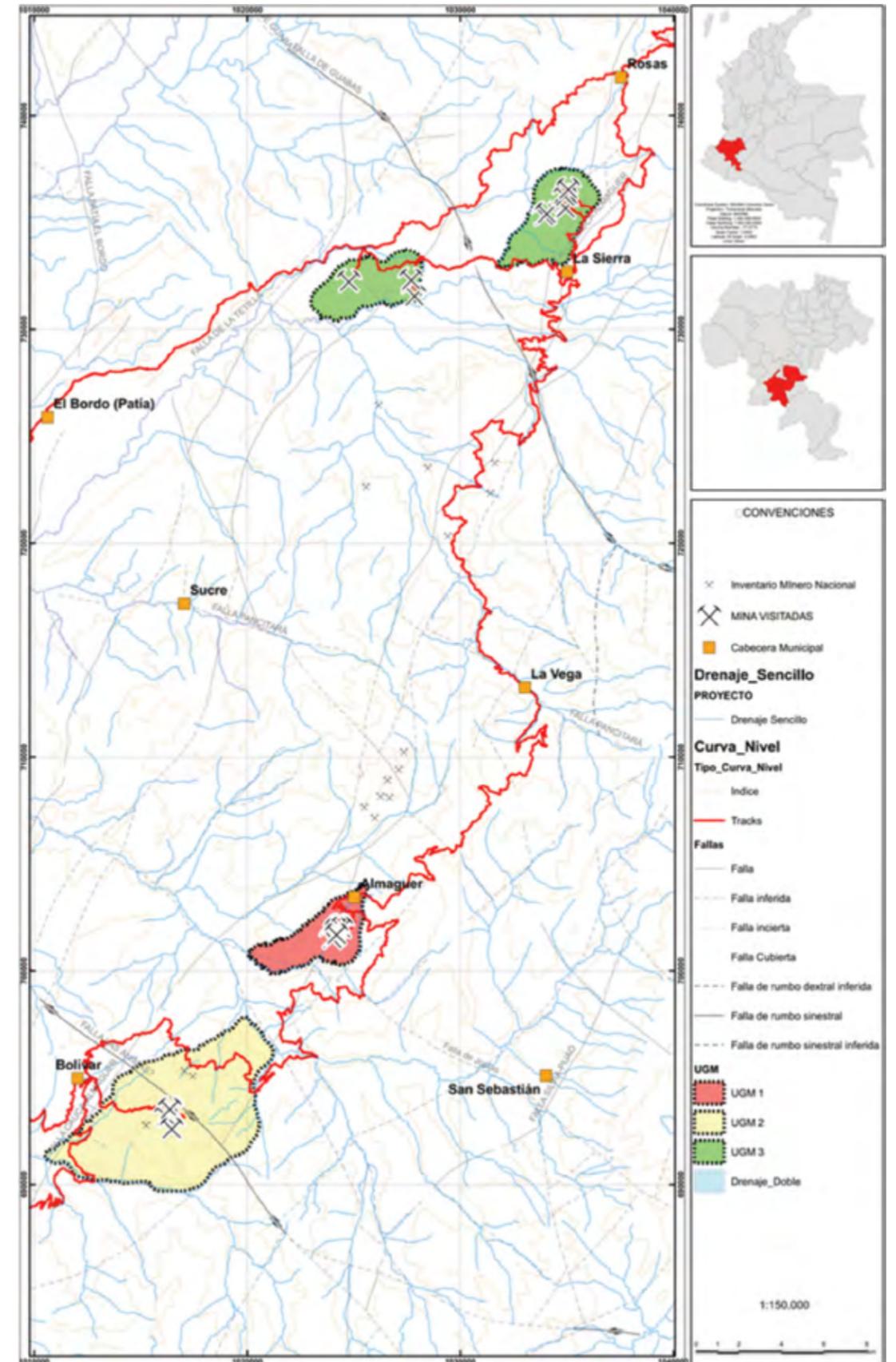
En el área de trabajo se han diferenciado tres unidades geometalúrgicas importantes:

UGM 1: Almaguer. Unidad compuesta por sulfuros polimetálicos de grano grueso, como pirita y arsenopirita predominante, y galena accesoria, embebidos en una con matriz de cuarzo y abundante ganga carbonosa y grafitosa. La unidad está compuesta por tres menas diferenciables: a) Esquisto negro carbonoso grafitoso (?) con sulfuros pirita y arsenopirita (pirita arsenical); está dispuesto en corredores de dirección preferencial SE, con anchos variables de 1 a 1,5 m. b) Vetas de cuarzo-carbonato con rumbos E-W y buzamientos verticales; involucra roca de caja con esquisto y arsenopirita en bajas proporciones. c) Venas angostas de cuarzo-carbonato y sulfuros pirita-arsenopirita como constituyentes mayores, y en menor proporción minerales supérgenos, galena y sulfosales de cobre (figura 4.28).

El oro en esta unidad está generalmente incluido en cuarzo o estrechamente relacionado con la arsenopirita. Se presenta de grano fino, el 50% en peso por debajo de 80 μm , pero con tenores frecuentemente altos, por encima de 40 gramos por tonelada.

Esta unidad se considera de alta refractariedad (color rojo) debido a la estrecha relación del oro con minerales ricos en carbón, que regularmente dificultan su beneficio. Esta unidad se presenta únicamente en las minas del municipio de Almaguer.

Figura 4.28. Mapa de unidades geometalúrgicas. Fuente: autores.



UGM 2: Bolívar. Unidad compuesta por cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos de esquistos carbonosos con contenidos de sulfuros polimetálicos con predominio de pirita y cantidades menores de esfalerita, galena, calcopirita y sulfosales de plata.

El oro se presenta regularmente en cuarzo y asociado con pirita, generalmente de tamaños grandes, cerca del 70% en peso por encima de 100 µm, con formas angulares y bordes rectos. El 30% restante se asocia con arsenopirita

La unidad se considera moderadamente refractaria (color amarillo), básicamente por el considerable contenido de esquistos carbonosos y grafitos aportados por la roca encajante, que generan problemas en las operaciones de beneficio (figura 4.28).

UGM 3: La Sierra. Mena de cuarzo con fragmentos líticos de rocas ígneas porfíricas y cantidades moderadamente altas de sulfuros polimetálicos, como pirita, menores contenidos de esfalerita y galena, y bajos contenidos de carbonato, telururos y sulfosales de plata. El oro está básicamente asociado con pirita y esfalerita, y secundariamente incluido en cuarzo, representado en una distribución bimodal de partículas menores de 100 µm, y otras por encima de 140 µm. Esta unidad se considera de baja refractariedad (color verde), y no se esperan dificultades en los procesos de beneficio (figura 4.28).

4.4. ANÁLISIS PETROGRÁFICOS DE MATERIAL DE PROCESO METALÚRGICO

Los análisis petrográficos son útiles en la caracterización visual de los minerales sometidos a procesos de beneficio, proceso en el 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 realizar 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.

4.4.1. LIBERACIÓN DE SULFUROS

Ciertos procedimientos metalúrgicos están fuertemente influidos 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 dichos minerales.

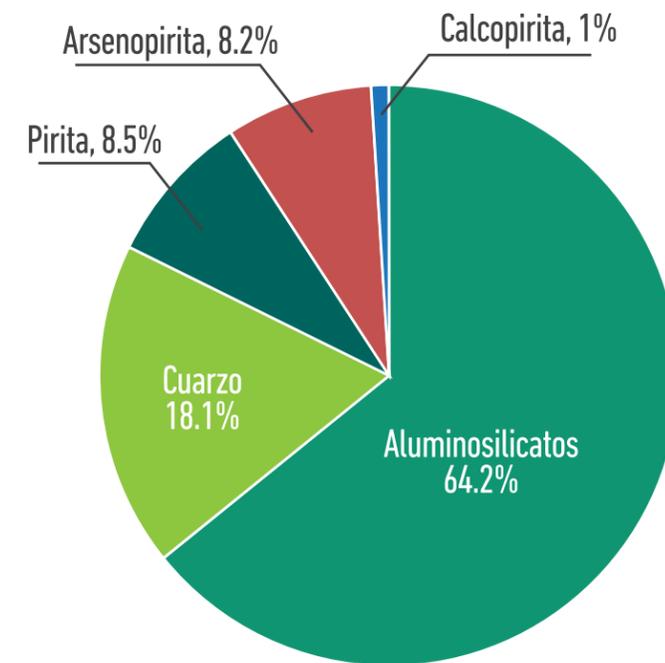
Esta técnica determina los parámetros de ensayos geometalúrgicos de dureza más influyentes para identificar el grado de liberación de los minerales sulfurados asociados a la mineralización de oro, así como las asociaciones mineralógicas y el tamaño de los granos de oro encontrados en los análisis petrográficos de cada uno de los materiales de plantas de beneficio instaladas.

4.4.1.1. LIBERACIÓN DE SULFUROS EN EL MUNICIPIO DE LA SIERRA, MINA LA PODEROSA

La distribución mineralógica está dominada por ganga compuesta principalmente por fragmentos de roca o líticos (ganga 2), 64 %, y cuarzo-feldespatos (ganga), 18 %. Entre los sulfuros predomina pirita (9 %), arsenopirita (8 %), y en menor proporción, calcopirita (1 %). Óxidos de hierro, como la hematita, son relativamente escasos. La pirita, sulfuro predominante, se encuentra libre, mientras que la arsenopirita se observa ligada a fragmentos líticos (ganga 2) (figura 4.29).

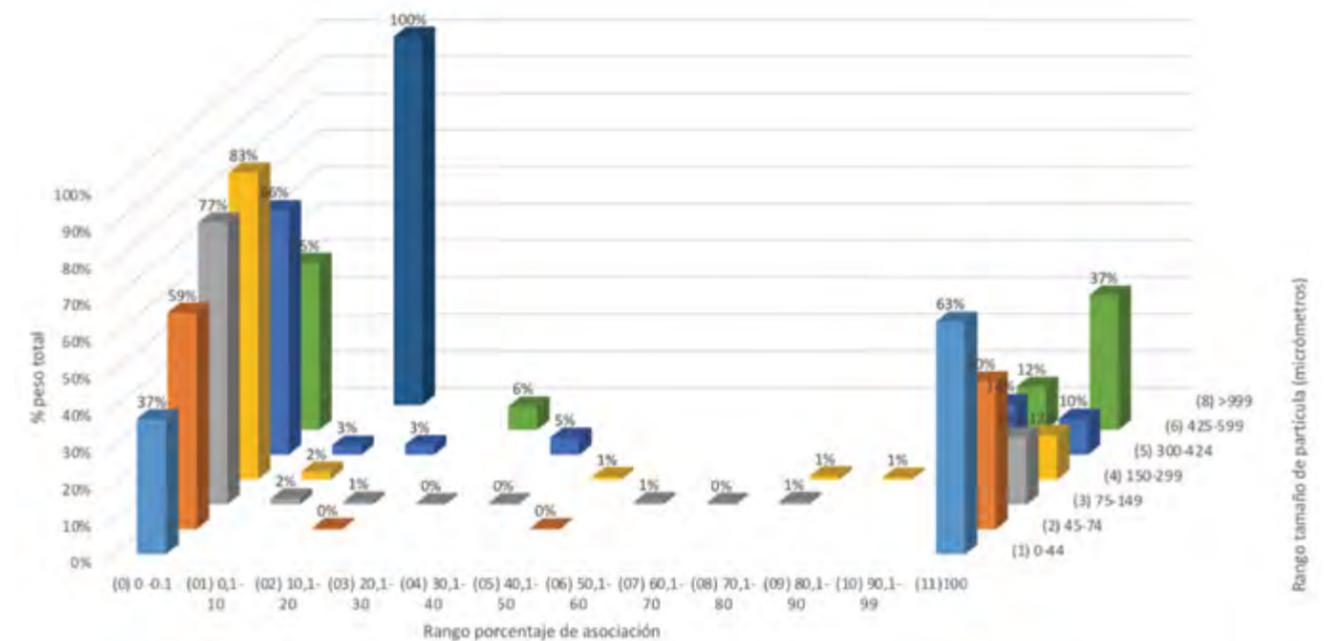
La distribución de sulfuros de acuerdo con su asociación con ganga muestra que en la mena triturada por encima de los 999 micrómetros el 100% del material corresponde a ganga con una proporción de sulfuros

Figura 4.29. Composición mineralógica del material de cabeza en la mina La Poderosa, La Sierra. Fuente: autores.



incluidos o asociados menor al 10%. Entre los 45 y 600 micrómetros el contenido de sulfuros libres es del 23.4% en promedio y el porcentaje promedio de ganga libre es del 66%. En rangos de tamaño menores a 45 micrómetros el 63 % de sulfuros se encuentra libre y el 37% corresponde a ganga libre (figura 4.30).

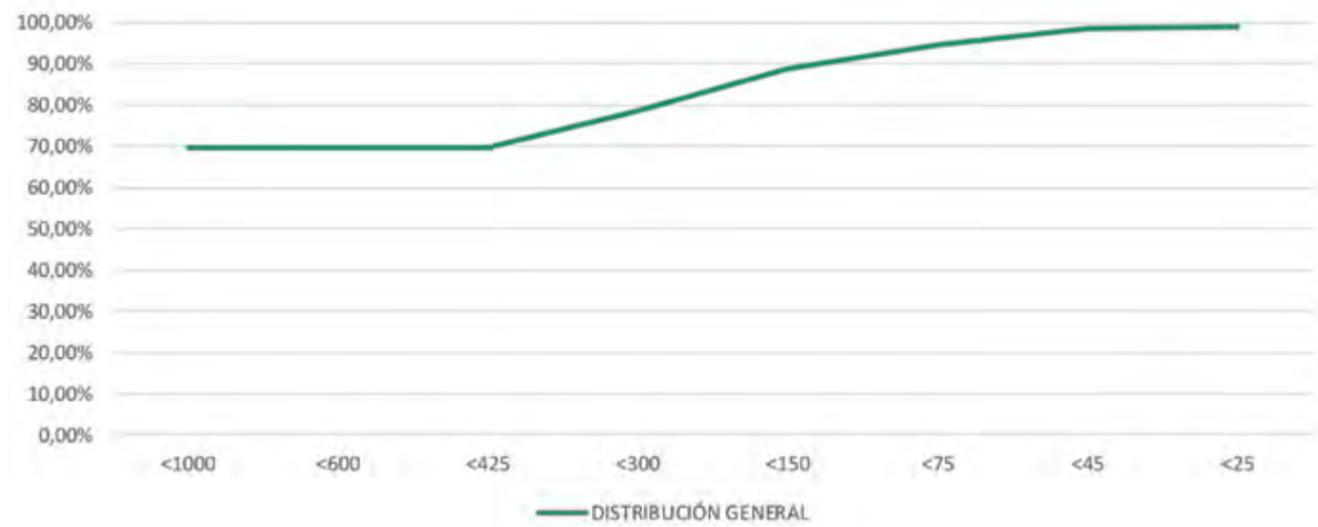
Figura 4.30. Relación de asociación sulfuro con ganga según el rango de partícula en la mina La Poderosa, La Sierra. Fuente: autores.



La figura 4.31, relativa a la mena La Poderosa, indica que el material cabeza de proceso está triturado a 1.4 mm, la distribución de tamaño general de minerales metálicos es creciente por fracción, se inicia con partículas liberadas en una proporción del 70%, manteniéndose en ese porcentaje hasta llegar a un tamaño <425 micrómetros, allí se va incrementando constantemente en las fracciones más finas hasta alcanzar un grado de por encima del 95% a un tamaño <45 micrómetros. Teniendo como d80 un tamaño <300 micrómetros.

4.4.1.2. LIBERACIÓN DE SULFUROS EN LA MINA EL HIGUERÓN, MUNICIPIO DE

Figura 4.31. Grado de liberación de material de cabeza en la mina La Poderosa, La Sierra. Fuente: autores.



ALMAGUER

La mena está constituida principalmente por arsenopirita 8%, pirita arseniosa 5%, pirita 1.5% y cantidades traza de pirita framboidal, calcopirita, galena y óxidos de hierro (hematita). La arsenopirita de mayor proporción en los minerales de mena se presenta principalmente libre o incluida en cuarzo, mientras la pirita se presenta libre principalmente con el 5% de pirita arseniosa. La ganga (cuarzo, feldespatos) es del 35% mientras los carbonatos alcanzan el 33% (Figura 4.32).

Figura 4.32. Composición mineralógica de material de cabeza en la mina El Higuero, Almaguer. Fuente: autores.

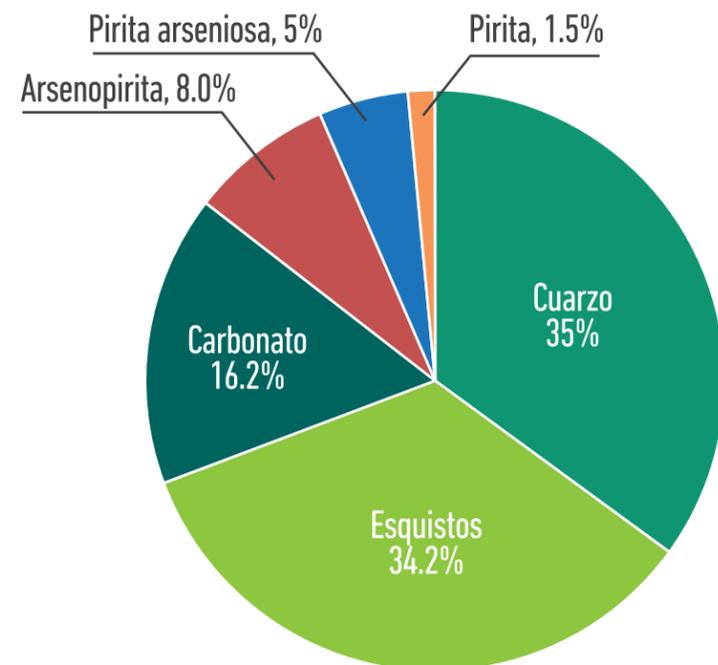
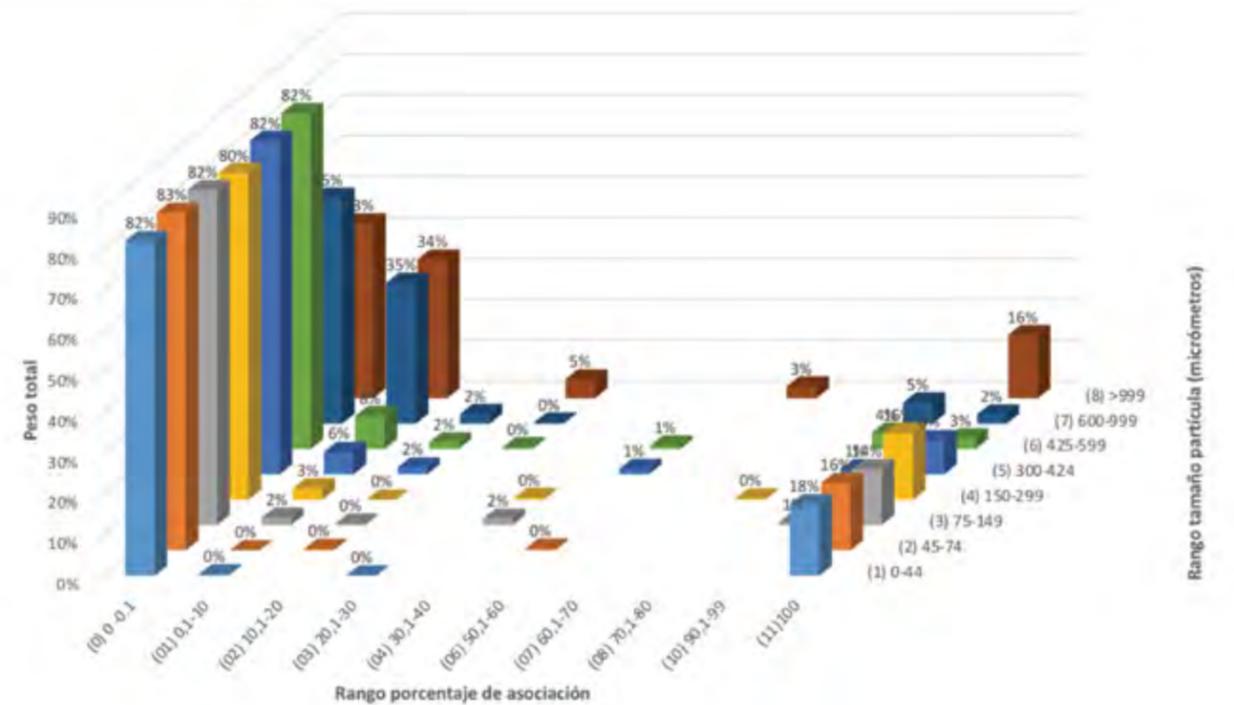
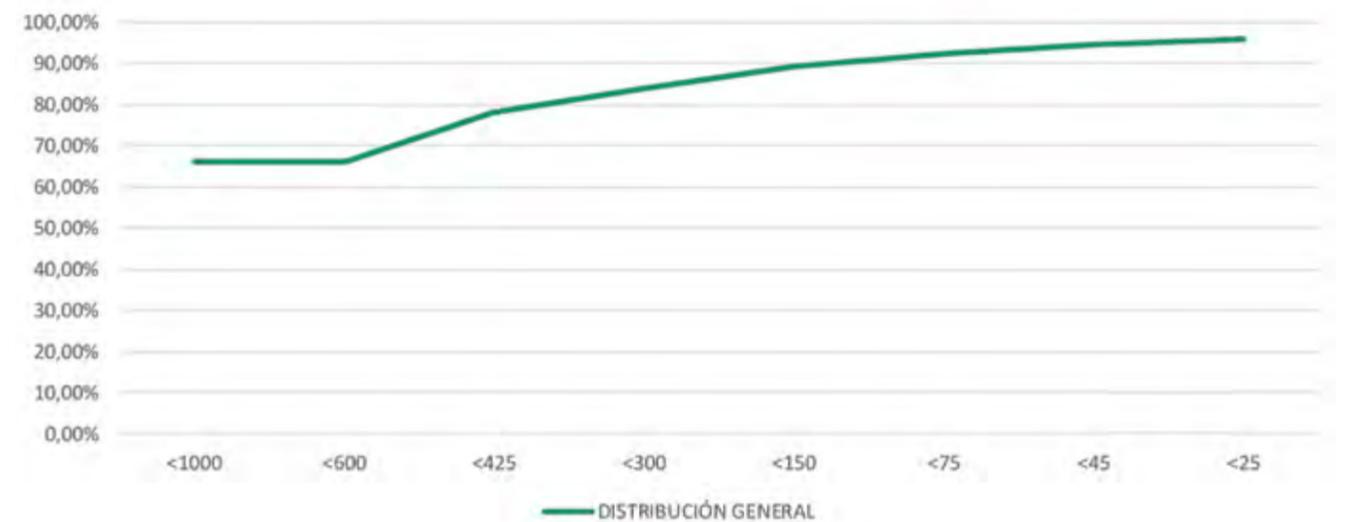


Figura 4.33. Relación de asociación de sulfuro y ganga según el rango de partícula en la mina El Higuero, Almaguer. Fuente: autores.



Teniendo en cuenta que el material cabeza de proceso está triturado a 1.4 mm, la distribución de tamaño general de minerales metálicos indica que inicialmente se halla libre el 68%, posteriormente se incrementa hasta llegar a un máximo de 98% de liberación de minerales metálicos, obteniendo así un d80 en el rango de tamaño de 425 y 300 micrómetros.

Figura 4.34. Grado de liberación de material de cabeza en la mina El Higuero, Almaguer. Fuente: autores.



La distribución de sulfuros de acuerdo con su asociación con ganga muestra que en la mena triturada por encima de los 600 micrómetros más del 80% del material corresponde a ganga con una proporción de sulfuros incluidos o asociados menor al 20% y el 16% son sulfuros libres. Entre los 45 y 600 micrómetros el con-

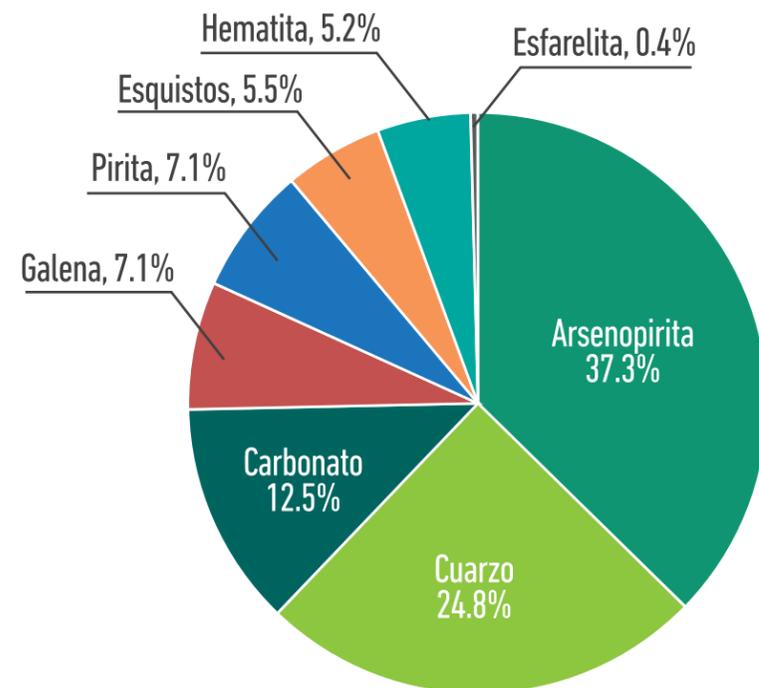
tenido de sulfuros libres es muy bajo y corresponde en promedio al 11% y el porcentaje promedio de ganga libre es del 82%. En rangos de tamaño menores a 45 micrómetros el 18 % de sulfuros se encuentra libre y el 82% corresponde a ganga libre. El material restante de mena se distribuye a lo largo de los diferentes rangos de tamaño de partícula en diferentes proporciones de asociación sulfuro – ganga (4.33).

El grado de liberación de sulfuros alcanzado en la mena El Higuierón indica una liberación inicial del 95,9% por encima de los 600 micrómetros, y alcanza el 98,9% de la liberación en tamaños superiores a 300 micrómetros. Esta tendencia sigue relativamente constante hasta alcanzar el 99,9% de liberación de sulfuros por debajo de 75 micrómetros, lo que permite considerar la mena como de muy fácil liberación. En la secuencia inicial, por encima de los 44 micrómetros se presenta un 27,35% de sulfuros liberados y un 61,9% sin liberar (figura 4.34).

4.4.1.3. LIBERACIÓN DE SULFUROS EN LA MINA MONTEERRUCIO, MUNICIPIO DE BOLÍVAR

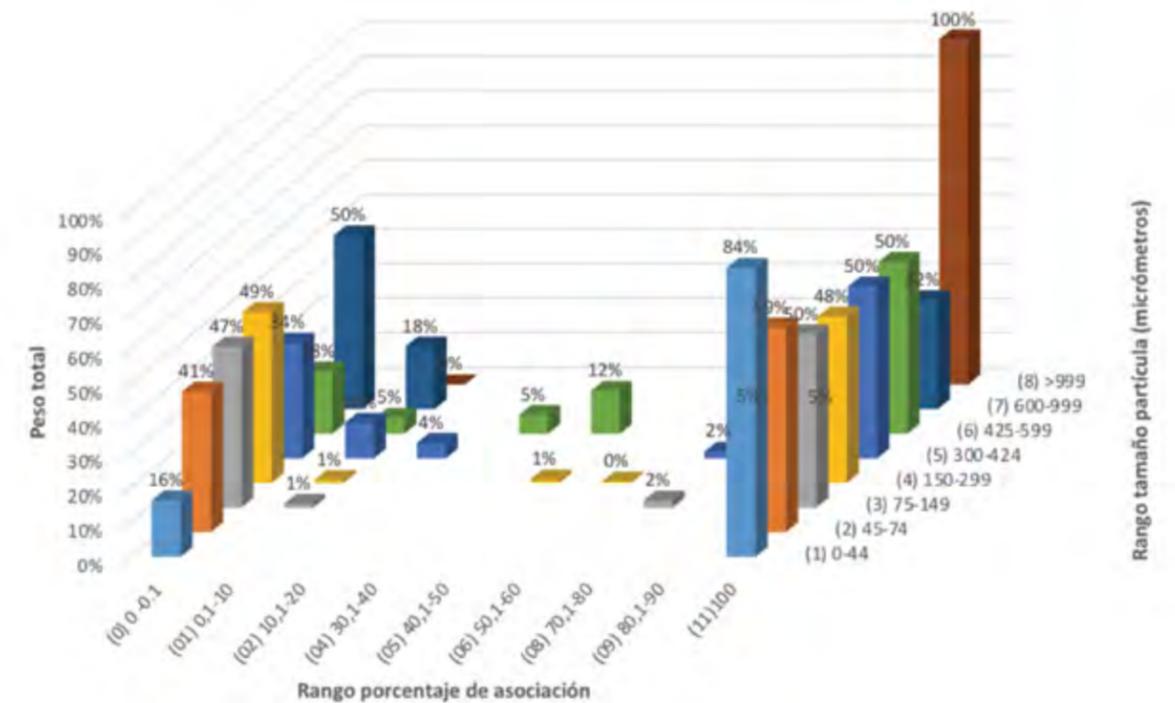
La mena está constituida por arsenopirita 37%, pirita 7%, galena 7% y óxidos de hierro (hematita) 5%, con cantidades traza de pirita framboidal, calcopirita, esfalerita y oro. La ganga representa un 42% de la composición de la mena la cual se distribuye en carbonatos 12%, cuarzo 25% y fragmentos de esquisto (ganga esquistos) 5%. La arsenopirita de proporción muy alta se presenta principalmente libre e incluida en fragmentos de esquisto, carbonatos y hematita. mientras la pirita se presenta libre o en cantidades traza del 0.06% de pirita framboidal. Se destaca la presencia de oro asociado a galena. (Figura 4.35).

Figura 4.35. Composición mineralógica del material de cabeza en la mina Monterrucio, Bolívar. Fuente: autores.



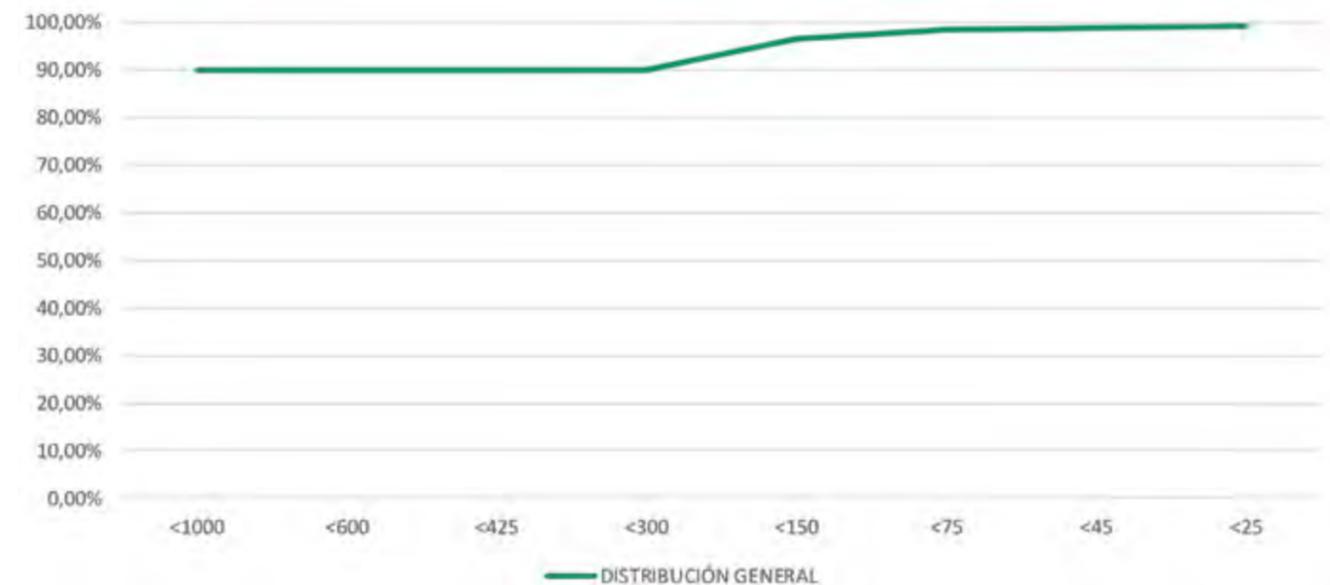
La distribución de sulfuros según su asociación con ganga muestra que en la mena triturada por encima de los 999 micrómetros el 50,8% del material corresponde a ganga, con una proporción de sulfuros incluidos o asociados menor del 10%; los sulfuros libres constituyen el 49,2%. Entre los 45 y 999 micrómetros, el porcentaje promedio de ganga libre es del 27%, y el contenido de sulfuros libres, del 59,3% en promedio. Se observa un incremento en la liberación a medida que disminuye el rango de tamaño de partícula hasta llegar al 88,5% de sulfuros libres en rangos de tamaño menores de 45 micrómetros, donde la ganga libre corresponde al 11,5%. El material restante de mena se distribuye a lo largo de los diferentes rangos de tamaño de partícula en diferentes proporciones de asociación sulfuro-ganga (figura 4.36).

Figura 4.36. Relación de asociación de sulfuro y ganga según el rango de partícula en la mina Monterrucio, Bolívar. Fuente: autores.



Teniendo en cuenta que el material de cabeza de proceso está triturado a 1.4 mm, obteniendo una distribución de tamaño general de minerales metálicos libre en un 90% y por debajo de los 75 micrómetros presenta su máxima liberación (100%).

Figura 4.37. Grado de liberación de material de cabeza en la mina Monterrucio, Bolívar. Fuente: autores.



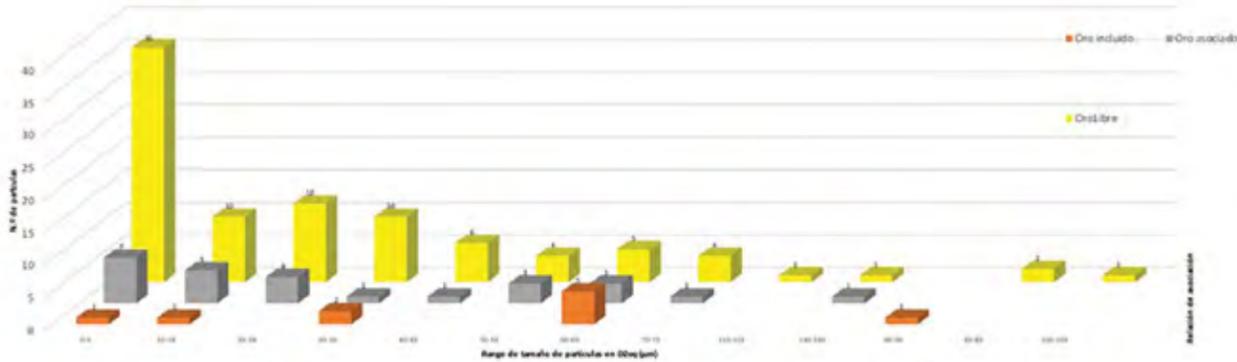
4.4.2. LIBERACIÓN DE ORO

Con el fin de realizar cálculos más representativos de la recuperación de oro se analizan concentrados de batea de las cabezas de proceso de tres minas del distrito minero de Almaguer, con el objeto de definir características como el tamaño de las partículas de oro, para lo cual se considera el diámetro equivalente de las partículas (D2Eq) estimado bajo el microscopio; además, también se tiene en cuenta el porcentaje acumulado en peso de las partículas y la relación de asociación con los sulfuros presentes en las muestras analizadas.

4.4.2.1. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA LA PODEROSA, MUNICIPIO DE LA SIERRA

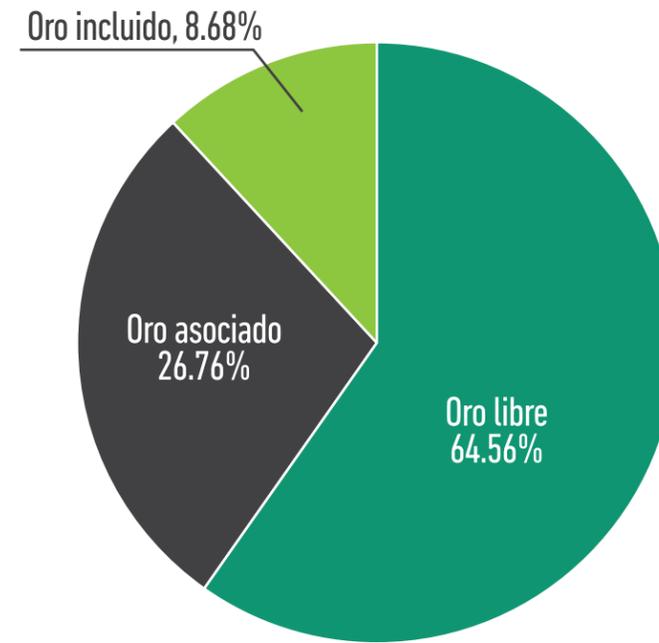
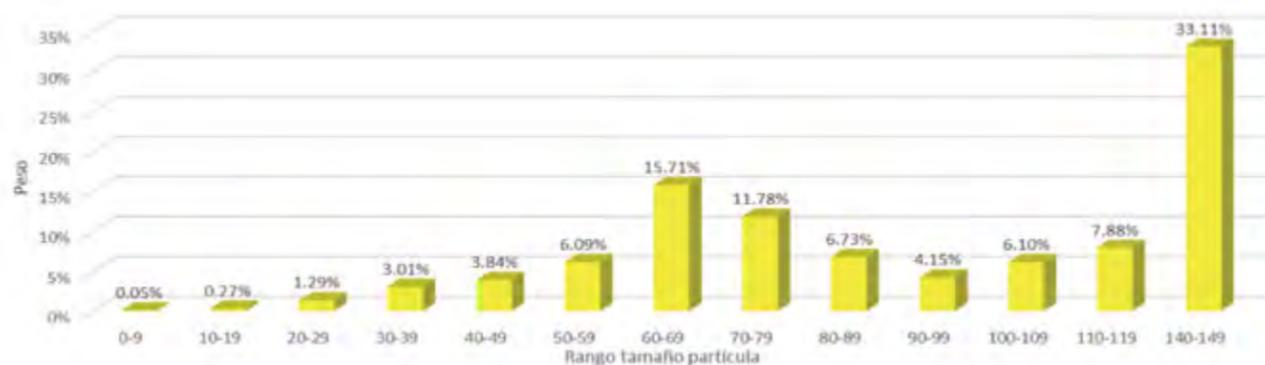
El tamaño de los granos, considerando el número de partículas de oro en la cabeza de proceso presenta una distribución bimodal, donde el mayor número de partículas se concentra en rangos de tamaños entre 10 µm y 80 µm relacionados principalmente con oro libre y en menor proporción con oro asociado a sulfuros, un segundo grupo de partículas se da por debajo de 10 µm la mayoría en estado libre (figuras 4.38 y 4.39).

Figura 4.38. Número de partícula vs. relación de asociación en material de cabeza. Fuente: autores.



El reparto de tamaño de las partículas de oro en porcentaje en peso muestra una distribución bimodal con numerosas partículas por debajo de 80 µm (42 %), mientras que por encima de este tamaño se halla el 55 %, que es recuperable por medios gravimétricos convencionales.. (Figura 4.39).

Figura 4.39. Tamaños de partículas según el porcentaje acumulado en peso de oro (Auw%). Fuente: autores.



La distribución mineralógica de oro en cabeza de proceso muestra una concentración de este mineral repartida de la siguiente manera: por encima de las 40 µm, el 65 % del oro se halla libre; el 8% corresponde a oro que se encuentra incluido con rangos de tamaño de partícula entre los 60 y 100 µm, de los cuales 7 % se encuentra incluido en ganga, 2 % y trazas en calcopirita y arsenopirita. El 27% restante aún permanece asociado con arsenopirita (18%), calcopirita (2 %), ganga (4%) y galena (2%), en rangos de tamaño de partícula por encima de los 50 µm (figura 4.40).

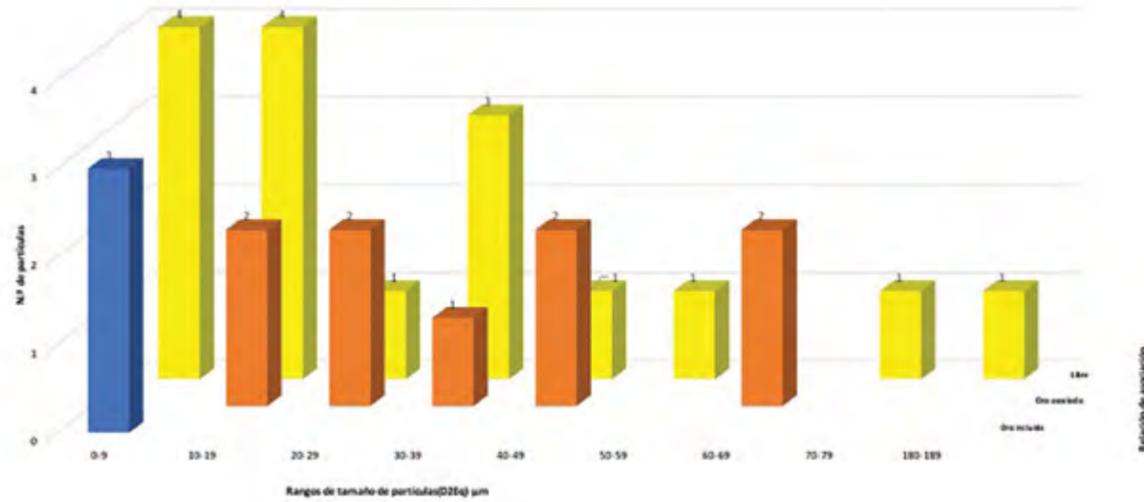
Figura 4.40. Presencia y asociación de oro en concentrado de cabeza de proceso. Fuente: autores.



4.4.2.2. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA EL HIGUERÓN, MUNICIPIO DE ALMAGUER

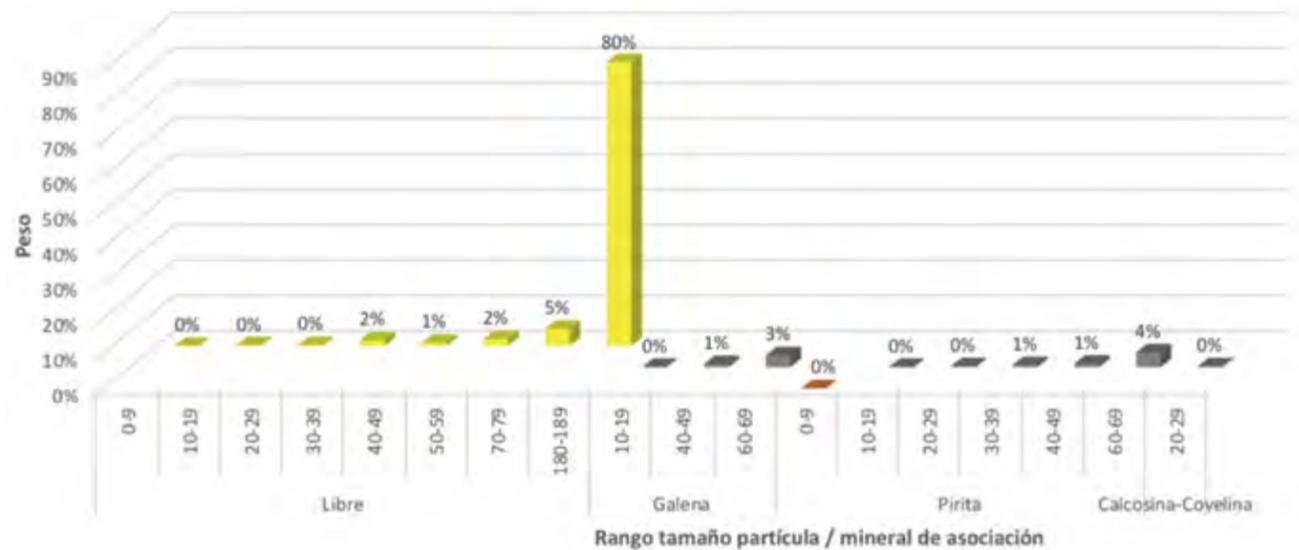
El tamaño de partícula de oro en cabeza de proceso de la mina eEl Higuerón tiene una distribución unimodal, en la cual el mayor número de partículas se concentra por debajo de los 80 µm; sin embargo, algunas partículas pueden llegar a alcanzar más de 180 µm (figura 4.41).

Figura 4.41. Tamaño de partícula y asociación en material de cabeza en la mina El Higuero. Fuente: autores.



El material observado en esta mina se caracteriza por tener una alta proporción de partículas por encima de 180 µm (80 %) de oro libre y recuperables por gravimetría. Las partículas finas por debajo de 80 µm corresponden al 20 %, con una mayor concentración en rangos de tamaño de partícula situados entre los 20 y 50 µm, que se encuentran principalmente asociadas con pirita, y en menor proporción con galena y calcosina covelina (figuras 4.42 y 4.43).

Figura 4.42. Presencia y asociación de oro en concentrado de cabeza de proceso en la mina El Higuero. Fuente: autores.

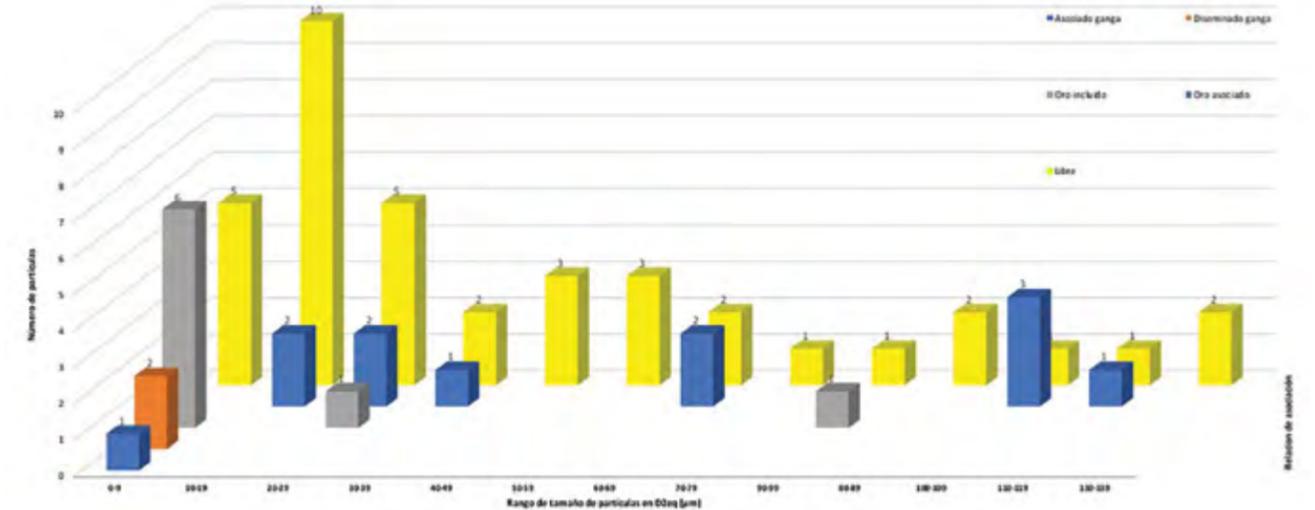


4.4.2.3. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA MONTERRUCIO, MUNICIPIO DE BOLÍVAR

En la cabeza de proceso se presenta el mayor número de partículas de oro en rangos de tamaños menores de 80 µm, relacionados principalmente con oro libre, mientras que una menor proporción está relacionada con oro incluido y asociado, tanto a sulfuros como a ganga. Hay una tendencia de incremento de granos por encima de 100 µm, que presentan esencialmente oro libre y asociado a sulfuros (figura 4.43).

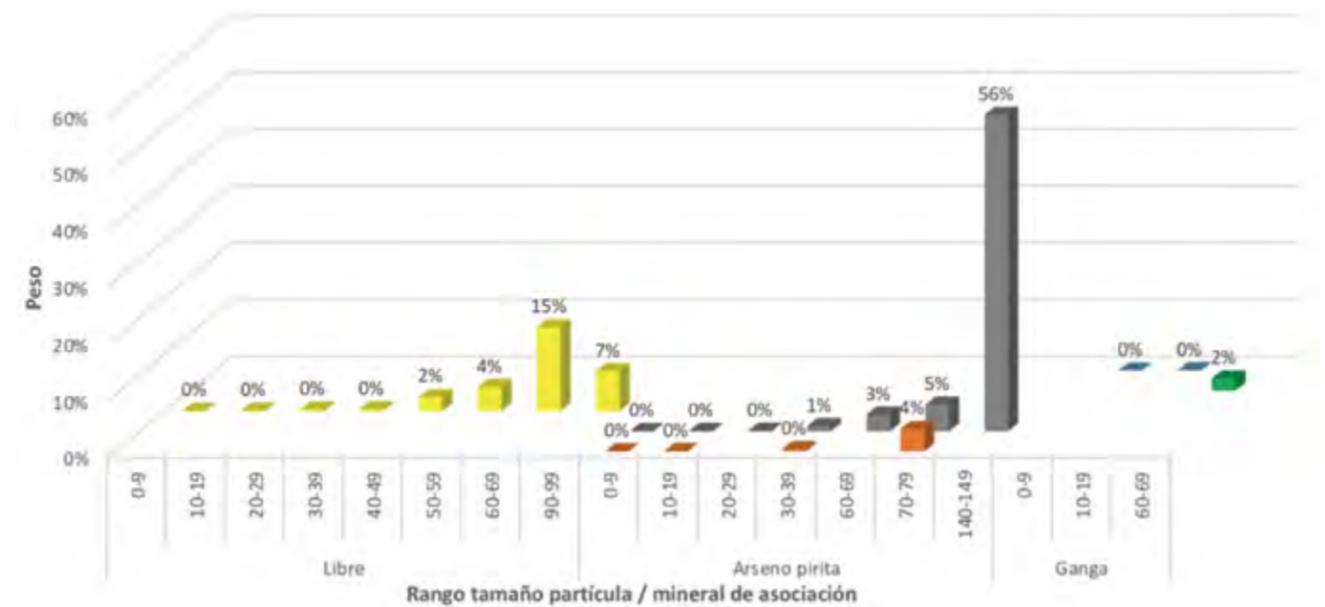
La distribución de oro en porcentaje en peso muestra que cerca del 78% de las partículas se encuentra por encima de 80 µm, porción que es que es recuperable por medios gravimétricos convencionales, mientras que el 22% restante requiere de técnicas un poco mas sofisticadas como la flotación espumante (figura 4.45.),

Figura 4.43. Número de partícula vs. relación de asociación en material de cabeza en la mina Monterrudio. Fuente: autores.



En Monterrudio, la distribución mineralógica de oro en cabeza de proceso muestra una concentración repartida de la siguiente manera: el 28 % del oro libre se halla principalmente por encima de los 60 µm, mientras que el 65 % corresponde a oro asociado con arsenopirita en rangos de tamaño de partícula mayores de 60 µm. Finalmente, el 4% del oro se encuentra incluido en arsenopirita con tamaños situados entre los 90 y los 100 µm, y el restante se encuentra diseminado en ganga con tamaños menores de 10 µm, mineral que no es recuperable (figura 4.44).

Figura 4.44. Presencia y asociación de oro en concentrado de cabeza de proceso en la mina Monterrudio. Fuente: autores.



4.5. CONSIDERACIONES EN GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA PARA EL BENEFICIO

- El ambiente geológico de mineralización a lo largo de grandes fallas regionales, como el sistema de Romeral, y su relación con magmatismo asociado a la presencia de pórfidos de cobre y oro representan condiciones excepcionales para la explotación aurífera.
- Las rocas encajantes, como pórfidos dacíticos y andesíticos, presentan alteración hidrotermal de baja intensidad y baja dispersión, lo que hace que el aporte de minerales de arcilla sea bajo y favorezca las operaciones de beneficio.
- La composición mineralógica de las zonas se caracteriza por el predominio de pirita y arsenopirita. Las diferencias se observan en sulfuros minoritarios como esfalerita, galena y calcopirita, comunes en La Sierra y Bolívar, y en cambio relativamente escasas en Almaguer. Sulfosales de plata, como tetraedrita o telururos, son también escasos.
- La presencia de esquistos carbonosos en las minas de Almaguer le imprimen un carácter refractario a la mena y permiten anticipar dificultades en su beneficio.
- Los sulfuros polimetálicos, como pirita y arsenopirita, abundantes en las menas, con cantidades bajas de esfalerita, galena y calcopirita, son poco reactivos en los procesos de beneficio y se encuentran naturalmente en bajas condiciones de oxidación.
- La ganga, predominantemente de cuarzo y fragmentos líticos con presencia de carbonatos, es notable en las minas de Almaguer, y bajo en las otras zonas. Mientras los fragmentos líticos de La Sierra son de origen ígneo, en Almaguer son carbonosos y grafitosos.
- En La Sierra el oro se encuentra asociado a pirita y esfalerita; en Bolívar, a pirita y arsenopirita, mientras que en Almaguer se asocia con pirita o se encuentra libre en cuarzo.
- El tamaño del oro en La Sierra es bimodal, con partículas mayores de 150 μm y menores de 70 μm . En Bolívar las partículas de oro también se presentan de tamaño grande, mayor de 150 micrómetros, mientras que en Almaguer su tamaño es relativamente pequeño, por debajo de 70 μm .
- Se han definido tres unidades geometalúrgicas: la primera, UGM 1, corresponde a una mena muy refractaria, presente en las minas de Almaguer. Otra unidad geometalúrgica (UGM 2) corresponde a una mena en la que parte de la roca encajante presenta esquistos carbonosos; se considera moderadamente refractaria y se presenta en el municipio de Bolívar. Por último, la UGM 3, con baja refractariedad, corresponde a una mena de ganga de cuarzo y feldespatos con abundantes sulfuros polimetálicos poco reactivos, principalmente pirita y cantidades menores de minerales de Zn, Pb y Cu.
- Las minas del sector de Frontino, en el municipio de La Sierra, contienen mayor cantidad de sulfuros que las de Almaguer y Bolívar.
- La mineralización aurífera de La Sierra está compuesta, en orden de abundancia, por pirita, esfalerita, galena y calcopirita, minerales que son poco reactivos a los procesos de beneficio; no obstante, se encuentran pequeñas cantidades de tetraedrita y arsenopirita, que podrían eventualmente demorar las etapas de cianuración.

- Mineralógicamente, el material que se lleva a proceso en las minas de La Sierra se caracterizan por altos contenidos de sulfuros, esencialmente pirita y ganga de cuarzo y feldespato, con bajas cantidades de carbonatos. En Bolívar el material de cabeza tiene una composición similar de sulfuros, pero la ganga contiene cantidades apreciables de esquistos carbonosos, mientras que el material de Almaguer contiene baja cantidad de pirita y arsenopirita, pero la ganga es de material carbonoso y grafitoso de difícil procesamiento y manejo.
- En resumen, en La Sierra cerca del 45% del oro es libre, y se presenta en partículas cuyo tamaño es mayor de 80 μm ; por su parte, el oro de Bolívar puede ser más fácilmente recuperable por gravimetría, puesto que cerca del 55% de este mineral es libre y se encuentra por encima de los 80 μm , mientras que en Almaguer el 50% del oro tiene un tamaño mayor de 80 μm y es recuperable gravimétricamente, pero el resto se halla asociado con pirita, con una ganga carbonosa probablemente reactiva a procesos de beneficio.

4.6. CONCLUSIONES EN ASPECTOS GEOLÓGICOS, MINERALÓGICOS, QUÍMICOS, AMBIENTALES Y METALÚRGICOS

- El distrito minero se encuentra localizado en una zona de muy alto potencial aurífero. Las rocas asociadas a la mineralización se formaron en una reconocida época metalogénica de evolución de la cordillera Central y la cuenca Cauca-Patía, como parte de la subprovincia Cauca-Romeral, durante el Neógeno.
- Existe un estricto control estructural de las áreas mineras visitadas que coincide con el fallamiento en dirección predominante noreste del sistema de fallas Cauca-Almaguer, y el sistema de fractura NW-SE.
- Las rocas encajantes, como pórfidos dacíticos y andesíticos, presentan alteración hidrotermal adyacente a las franjas mineralizadas, con características de baja intensidad y baja dispersión. En minas de La Sierra se observa carbonatización y sericitización (propilítica-fílica), mientras que las de Bolívar se observa argilización y sericitización (argílica-fílica). Por otro lado, en la zona de Almaguer se presenta esencialmente alteración fílica.
- La mineralización aurífera en cada municipio es diferente: en La Sierra se presentan zonas de cizalla con presencia de vetas de cuarzo y sulfuros polimetálicos encajados en rocas ígneas porfiríticas. En Almaguer la zona de cizalla es más amplia e involucra vetas y fragmentos de vetas muy deformados, encajados exclusivamente en esquistos carbonosos metamórficos, a manera de brecha tectónica, donde se mezclan varios eventos de mineralización; el contenido de sulfuros es relativamente bajo, y predominan pirita y arsenopirita. Entretanto, en el municipio de Bolívar la explotación minera se desarrolla a lo largo de una zona de cizalla que pone en contacto numerosos y pequeños cuerpos de roca ígnea porfirítica con los esquistos carbonosos hospedantes. La mena consta de cuarzo y feldespatos con moderadas a altas cantidades de sulfuros polimetálicos, ricos en pirita y arsenopirita, con cantidades menores de galena y calcopirita.
- Los depósitos de La Sierra y Bolívar que se explotan superficialmente se consideran de origen epitermal, teniendo en cuenta únicamente la composición mineralógica y las relaciones de campo, dado que no se dispone de análisis microtermométricos de esta zona. El origen del depósito de Almaguer, dadas sus características, contiene minerales de origen epitermal y características tectónicas de depósitos orogénicos; por tanto, se considera que en la zona de Almaguer se presenta una superposición de menas auríferas de diferente origen.
- Mineralógicamente, el material que se lleva a proceso en las minas de La Sierra se caracteriza por altos contenidos de sulfuros, esencialmente pirita y ganga de cuarzo y feldespatos con bajas cantidades de carbonatos. En Bolívar, el material de cabeza tiene una composición similar de sulfuros, pero la ganga contiene cantidades apreciables de esquistos carbonosos, mientras que el material de Almaguer contiene baja cantidad de pirita y arsenopirita, pero la ganga es de material carbonoso y grafitoso de difícil procesamiento y manejo.
- Tomando como referencia el oro de las plantas analizadas, y considerando que oro de tamaño mayor a 80 μm es recuperable gravimétricamente, se puede resumir que tanto para el municipio de la Sierra cerca del 45% del oro está libre; por su parte, el oro de Bolívar cerca del 52% está libre, como el oro de Almaguer el 50% están libres, el resto del oro tanto de menor tamaño como partículas asociadas e incluidas, requiere de tratamiento especial para su recuperación, particularmente el oro de Almaguer que se halla asociado con pirita y ganga carbonosa probablemente reactiva a procesos de beneficio.

PROHIBIDO INGRESAR
MENORES DE 18 AÑOS
NO INGRESE SIN LOS
ELEMENTOS DE SEGURIDAD

5. ASPECTOS MINEROS

El proceso del beneficio de oro involucra la consecución de la materia prima, que es el mineral. Este se obtiene en el desarrollo de la actividad minera, específicamente, en el primer eslabón de la cadena productiva minero-metalúrgica. Para el desarrollo de este capítulo, se visitaron algunas minas del distrito minero de Mercaderes-Cauca donde se caracterizaron las actividades mineras y posteriormente se presentan consideraciones para mejorar la productividad minera.

Bocamina en el municipio de Almaguer (Cauca). Fotografía tomada por Oscar Cardona, 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 pueden 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).

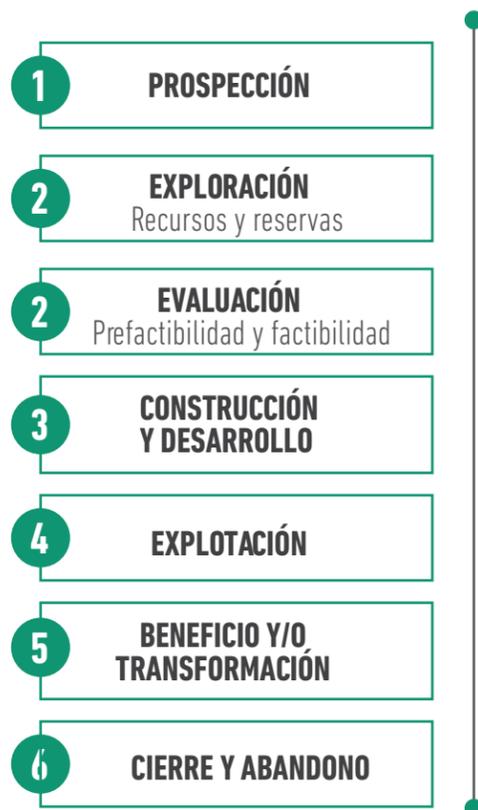
Producción. Durante la producción se extraen y procesan los materiales de interés económico, se readecuan los terrenos intervenidos y se conduce la mina. “Durante esta etapa se ejecuta una serie de actividades y ciclos que permiten que la mina permanezca en operación y producción. Estas son denominadas 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 empeladas 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, Hustulid 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).

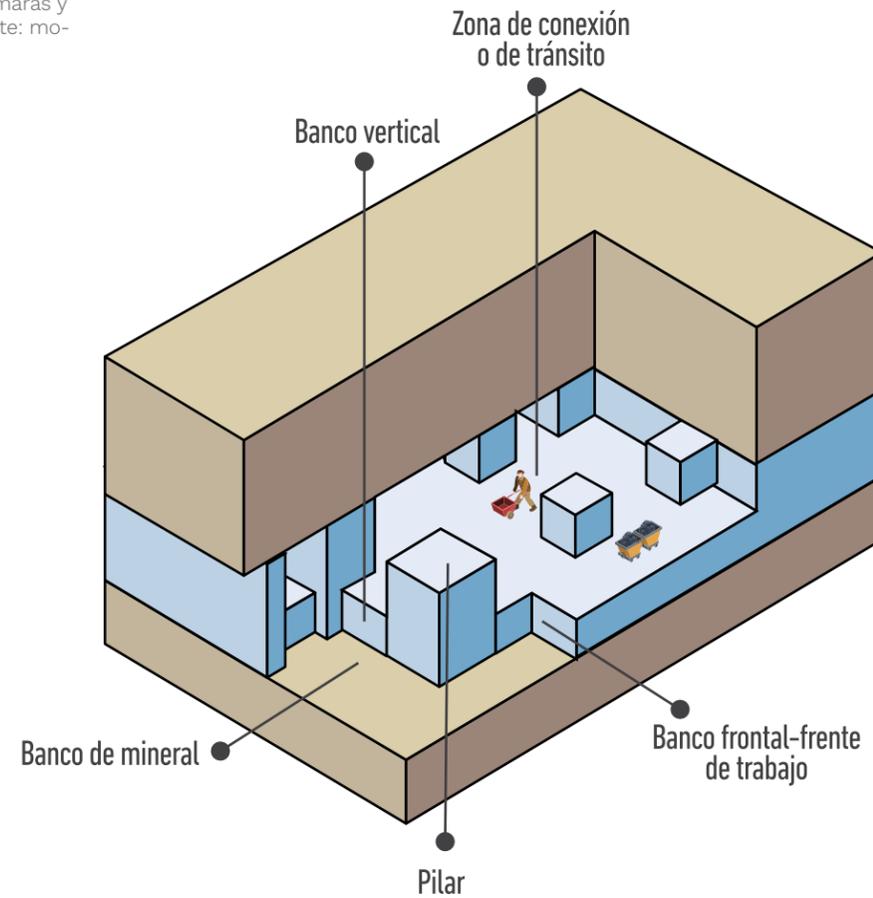
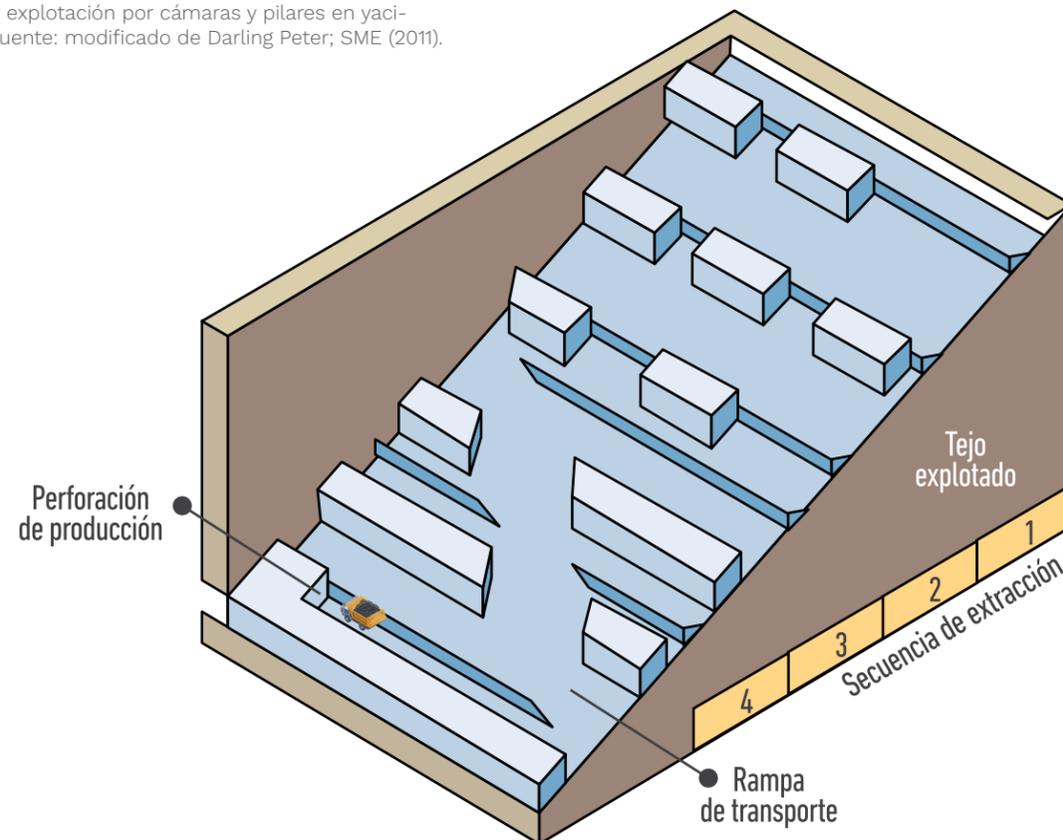


Figura 5.4. Método de explotación por cámaras y pilares en yacimientos inclinados. Fuente: modificado de Darling Peter; SME (2011).



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

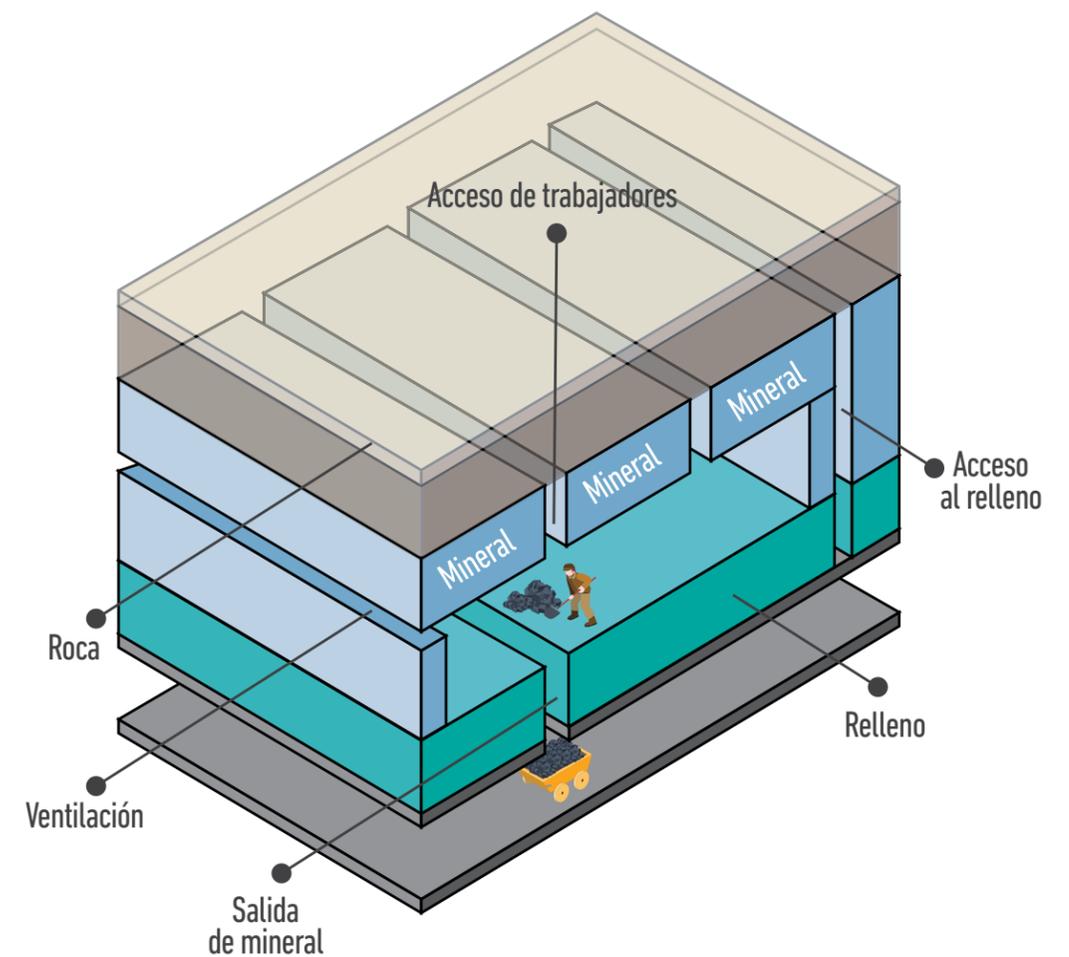
Variaciones:

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.

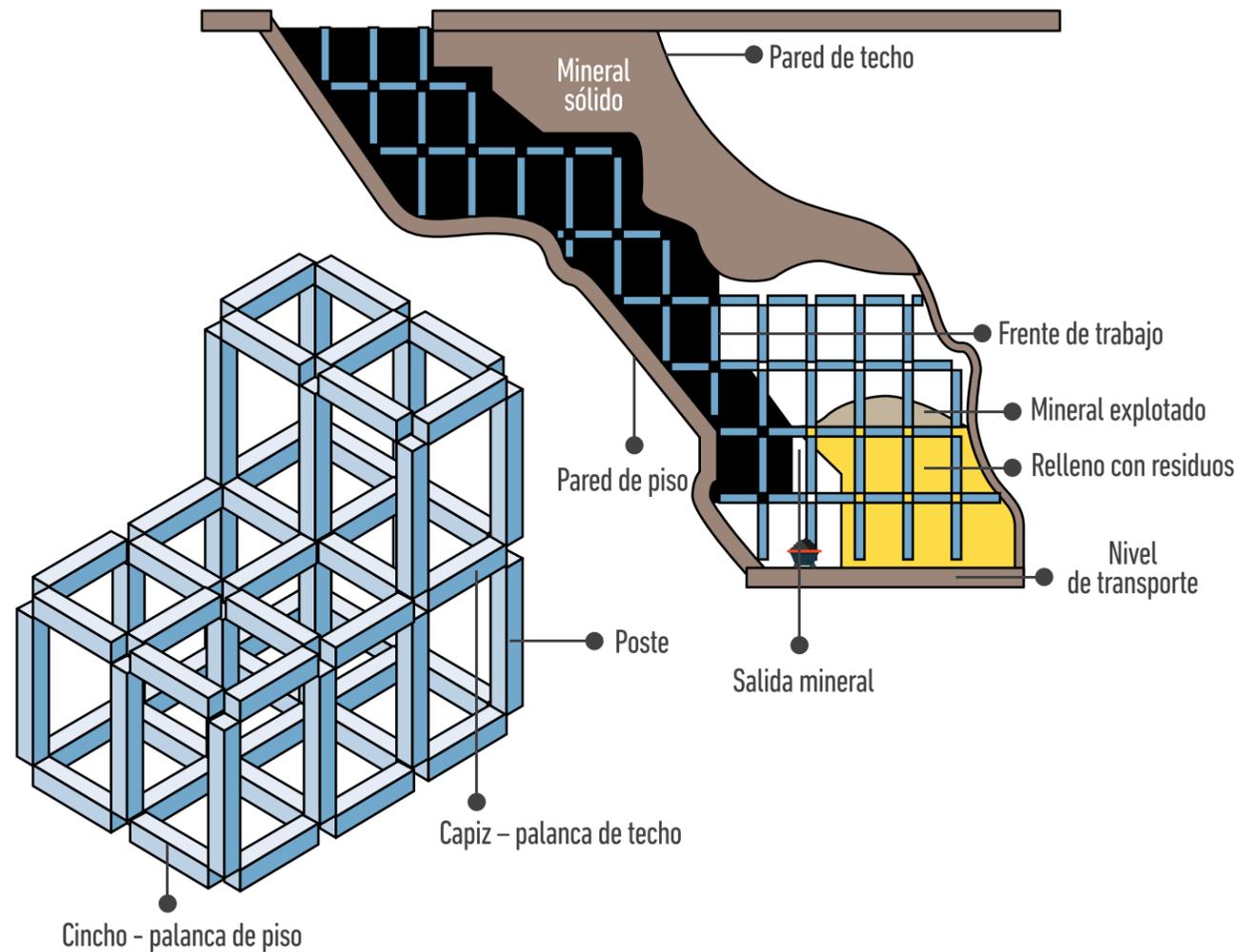
Figura 5.5. Método de explotación corte y relleno. Fuente: modificado de Here are the types... (2018).



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.

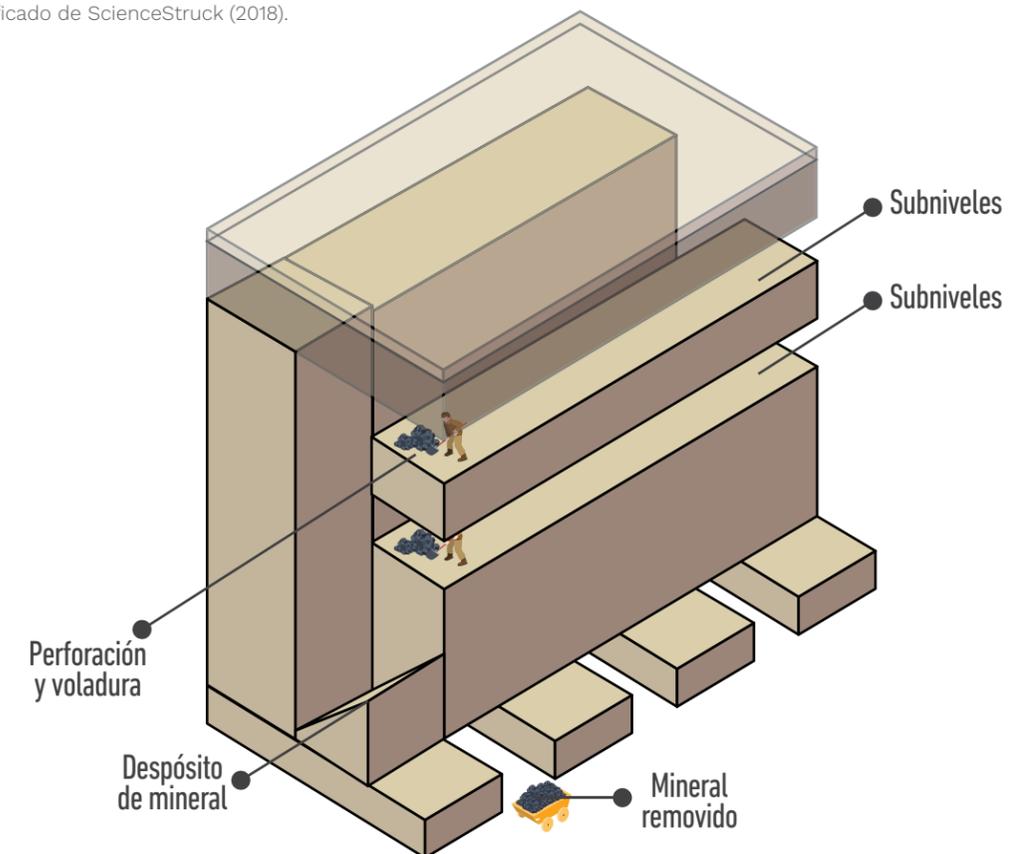
Este método se emplea en yacimientos tabulares de forma vertical o subvertical. Los siguientes son algunos parámetros que hay que tener en cuenta para utilizar este método de explotación:

- 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

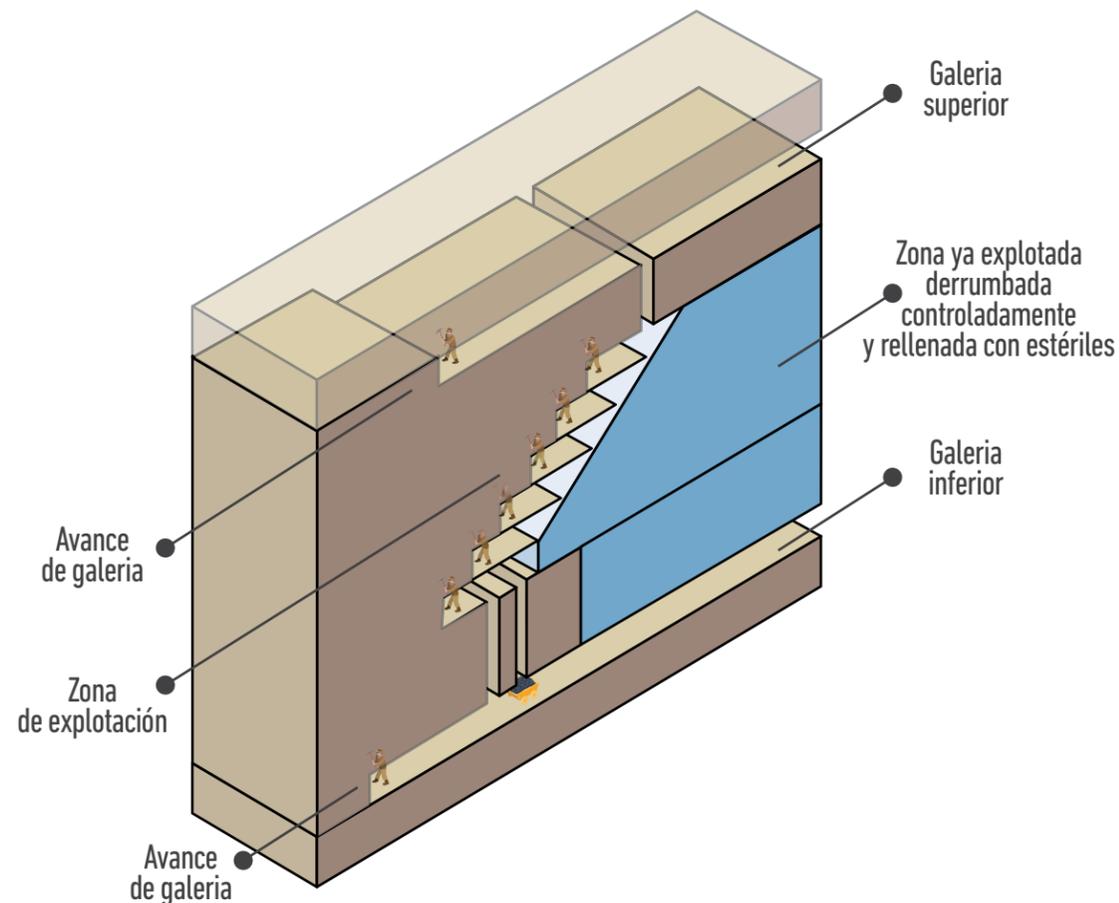
- Se utiliza en mineralizaciones con inclinaciones superiores a los 35°.
- Dependiendo de la dureza de los respaldos, se define si se requiere sostenimiento. Cuando los respaldos son inconsistentes se utiliza sostenimiento en cuadros.
- Los tambores avanzan por el filón siguiendo el buzamiento.
- Se 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°) (MME, 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, (MME, 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 cincels y mazos se realiza principalmente para arrancar minerales blandos o de textura media.

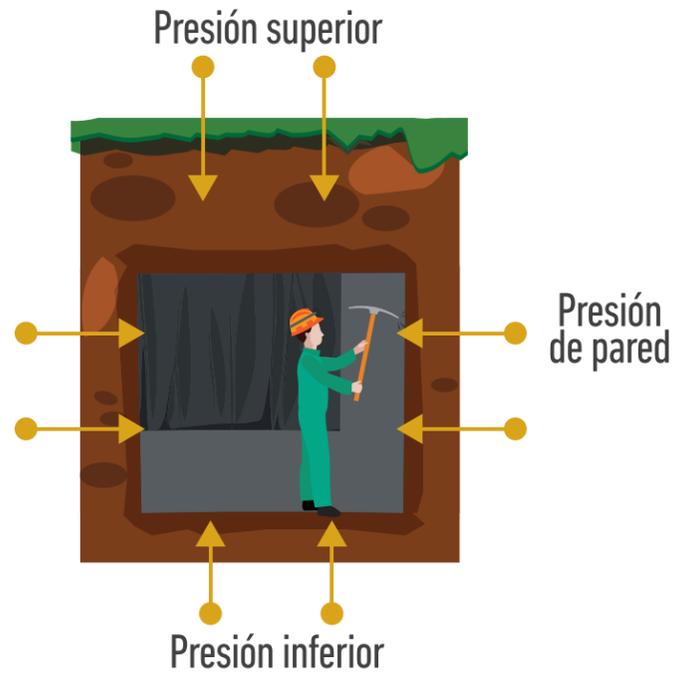
El **arranque con martillo picador** se realiza con aire comprimido y es empleado en rocas de dureza media.

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

Las excavaciones subterráneas presentan presiones de techo, laterales y de piso debido al propio peso de la roca y al espacio generado con la construcción de la galería. según las características geológicas, resistencia, fracturamiento y estabilidad de la roca se puede determinar el tipo de sostenimiento a utilizar natural o artificial. Ver figura 5.10.

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 o diaclasamientos y cuando, por sus condiciones naturales, no presenta suficiente competencia para sostenerse por sí misma. Por lo tanto, para garantizar la seguridad de la explotación y del personal se requiere implementar el sostenimiento artificial. Entre estos soportes se encuentran la entibación con madera, con puertas de madera como la alemana, medias puertas, canastas y cuadros. En las construcciones y explotaciones de mayor avance tecnológico se utilizan arcos de acero y pernos de anclaje, ver figura 5.11.

“El área de las labores definidas para el transporte debe ser suficientemente 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. El área mínima libre de una excavación minera en galerías debe ser de tres metros cuadrados (3 m²) con una altura mínima de uno

Figura 5.11. Tipos de sostenimiento. Fuente: autores.



Figura 5.12. 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.

coma ochenta metros (1,80 m)". (Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas. Decreto 1886 de 2015). Ministerio de Minas y Energía, 2015).

El sostenimiento de la mina depende de las condiciones de estabilidad de los respaldos. 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 a implementar en la labor minera, para esto se requiere realizar análisis de laboratorio para establecer la resistencia a la compresión y tensión de la roca. De manera inicial y preliminar se pueden identificar en terreno características de resistencia de la roca con la clasificación de Hoek E & Brown E. T. (2007) que se presentan en la figura 5.12, sin dejar de lado los estudios estructurales, geológicos y análisis de laboratorio.

5.1.4. TIPOS DE VENTILACIÓN

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, estableciendo 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 ó nivel. La diferencia de temperatura y presión barométrica genera una diferencia de peso específico entre el aire saliente y entrante, lo cual crea 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 "toda labor subterránea debe contar con un circuito de ventilación forzada", la ventilación contribuye a controlar los gases contaminantes de la mina, 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.

Los sistemas de ventilación son:

Sistema Soplante o impelente: caudal de aire impulsado por un ventilador hacia el interior de la mina, para

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 ₂ | 5.000 | 30.000 |
| Asfixiante-venenoso Explosivo | Monóxido de carbono | CO | 25 | - |
| Explosivo Venenoso Olor a huevo podrido | Acido Sulfhídrico | H ₂ S | 1 | 5 |
| Asfixiante inflamable | Anhidrido sulfuroso | SO ₂ | - | 0.25 |
| Asfixiante | Oxido Nítrico | NO | 25 | - |
| Asfixiante | Dioxido de Nitrogeno | NO ₂ | 0.2 | - |
| Explosivo sofocante | Metano | CH ₄ | - | - |
| Soporte de la combustión | Oxígeno | O ₂ | 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.

conducir el aire se utilizan mangueras o mangas de plástico o 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. (Guía de Seguridad para ventilación de Minas subterráneas, 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 (CH₄) 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 (CH₄). Fuente: Minminas, 2015, Decreto 1886. Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas.

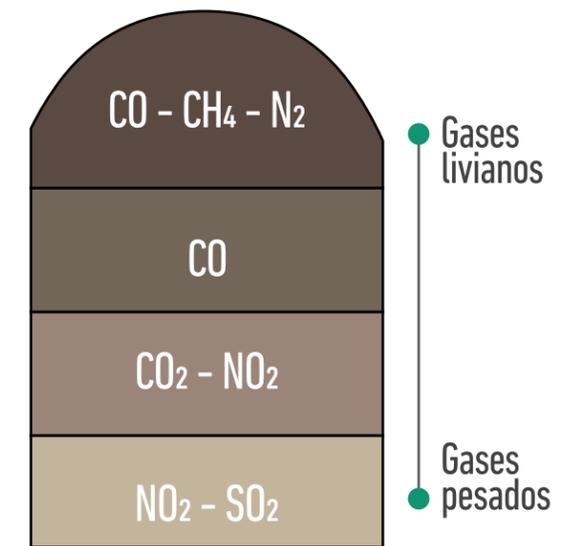
| LABOR SUBTERRANEA | PORCENTAJE (%) MÁXIMO PERMISIBLE DE METANO (CH ₄) | PORCENTAJE (%) LEL |
|---|---|--------------------|
| EN LABORES O FRENTE DE EXPLOTACION O AVANCE | 1.0 | 20% |
| EN LOS RETORNOS PRINCIPALES DE AIRE | 1.0 | 20% |
| EN EL RETORNO DE AIRE DE LOS TAJOS | 1.5 | 30% |
| EN EL RETORNO 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 se requiere 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 DE MERCADERES

Con el propósito de caracterizar el desarrollo minero en el distrito de Mercaderes (departamento del Cauca), se presentan las generalidades de las minas visitadas en cada municipio estudiado. De las explotaciones mineras que fueron muestreadas para obtener datos geológicos, solamente fue posible visitar ocho, por razones de tiempo, accesibilidad y dinámica de trabajo. 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:

Municipio de La Sierra:

- Pequeña explotación minera Puerta Guadua
- Pequeña explotación minera El Triunfo
- Pequeña explotación minera La Esperanza-Chatarreras 1
- Pequeña explotación minera la Esperanza-Chatarreras 2
- Mina artesanal La Poderosa
- Mina artesanal La linda

Municipio de Almaguer:

- Mina artesanal Mateguadua
- Mina artesanal Palo Verde

Municipio de Bolívar:

- Pequeña explotación minera Monterrucio

En el distrito de Mercaderes, las pequeñas explotaciones y minas artesanales corresponden a minería informal y algunos procesos de formalización y legalización de áreas de reserva especial que se encuentran en etapa de avance en los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar.

Los principales aspectos mineros caracterizados son:

- Sistema y método de explotación
- Descripción del método de arranque
- Descripción del sostenimiento minero
- Descripción del tipo de ventilación
- Descripción del cargue y transporte de material
- Aspectos ambientales mineros

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.

5.2.1. ASPECTOS MINEROS DEL MUNICIPIO DE LA SIERRA (CAUCA)

Las minas artesanales y de pequeña escala (MAPE) que se incluyeron en este estudio se localizan en las veredas Frontino Alto, Frontino Bajo, Sabaletas, Santa Lucia y La Depresión. En la zona se encuentra una Asociación de mineros que adelanta el proceso de formalización de la actividad minera mediante áreas de reserva especial.

La caracterización minera de las explotaciones visitadas en el municipio de La Sierra se detalla en las siguientes figuras.

Caracterización minera del municipio de La Sierra

| | |
|--------------------------------------|---|
| PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL | Pequeña explotación minera La Esperanza-Chatarreras 1 y 2 |
| VEREDA | Frontino Alto. |
| LABORES DE DESARROLLO | Sin desarrollar. Acceso por sendero. |
| FORMA DE EXPLOTACIÓN | El avance de la labor desde la bocamina es de 10 metros tiene una sección de 1.5 m2. |
| FORMA DE VENTILACIÓN | Natural. |
| SOSTENIMIENTO | Sostenimiento natural, en tramos se observa fracturación en bloques. Se recomienda que a medida que se avance en las labores se implemente el sostenimiento artificial. |
| FORMA DE ARRANQUE | Extracción de mineral con herramientas manuales. |
| CARGUE Y TRANSPORTE | El cargue y transporte lo realizan de manera manual con baldes y con carreta. |
| ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS | Material estéril acopiado en las laderas. |
| No DE PERSONAS VINCULADAS | 2 mineros y 8 mujeres en oficio de chatarreras. |
| PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO | 1 ton/semanal. |

| | |
|--------------------------------------|---|
| PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL | La Poderosa |
| VEREDA | Frontino Alto. |
| LABORES DE DESARROLLO | Sin desarrollar Acceso por sendero. |
| FORMA DE EXPLOTACIÓN | Cuenta con dos bocaminas un nivel superior e inferior, no se conectan debido a que hay labores derrumbadas. El método de explotación utilizado es Guías y Tambores. Explotan siguiendo el rumbo de las venillas de la veta con dirección N 40E y buzamiento de 90°. Se identificó una guía con longitud 34m hasta llegar a un frente de explotación derrumbado, también tambores y clavadas para extracción de mineral. |
| FORMA DE VENTILACIÓN | Se utiliza ventilación natural y artificial con ventilador tipo búfalo - motor de 2hp. |
| SOSTENIMIENTO | Sostenimiento natural en la mayor parte de las labores y en algunos puntos se presenta sostenimiento artificial con puertas de madera, tipo puerta alemana. Sección de trabajo entre 2.8 m² y 3 m². |
| FORMA DE ARRANQUE | Extracción de mineral con herramientas manuales, martillos ,fracturamiento de roca con herramientas artesanales. |
| CARGUE Y TRANSPORTE | El cargue se realiza de manera manual y el transporte al interior de la mina se hace con carretas y malacates artesanales con motor eléctrico. En la parte externa de la mina, se cuenta con un malacate que transporta el mineral por vía aérea desde el nivel superior de la mina hasta la planta de beneficio. |
| ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS | El material estéril se arroja en las laderas aledañas, lo cual genera impacto visual, contaminación del suelo y de las escorrentías aledañas. |
| No DE PERSONAS VINCULADAS | 4 mineros. |
| PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO | 6 ton/semana. |

| | |
|--------------------------------------|--|
| PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL | Pequeña explotación minera El Triunfo |
| VEREDA | Vereda Frontino Alto. |
| LABORES DE DESARROLLO | Sin desarrollar Acceso por sendero. |
| FORMA DE EXPLOTACIÓN | Guía y tambores. guía de acceso con longitud 7 m, clavada o tambor vertical con longitud de 24 m y dos guías de trabajo para acceso a la veta a los 6 y 14 m de profundidad. |
| FORMA DE VENTILACIÓN | Natural. |
| SOSTENIMIENTO | Guía: sostenimiento con puerta de madera la sección corresponde a 1.7 m ² . En la clavada: El sostenimiento se realiza con cuadros de madera y botadas. |
| FORMA DE ARRANQUE | Herramientas manuales Como barretones, picas y palas. |
| CARGUE Y TRANSPORTE | Malacate manual y carretas. |
| ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS | El material estéril es arrojado a las laderas, lo que ocasiona impactos visuales y posible contaminación del suelo y escorrentías. |
| No DE PERSONAS VINCULADAS | 3. |
| PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO | Se referencia: 1 tonelada semanal recuperando 2-3 gr/ ton. |

| | |
|--------------------------------------|--|
| PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL | Mina Artesanal La Linda |
| VEREDA | Vereda Frontino Alto. |
| LABORES DE DESARROLLO | Sin desarrollar Acceso por sendero. Se tiene proyectado construir un camino carretable. |
| FORMA DE EXPLOTACIÓN | Avance frontal en guías y cruzadas. Se tienen dos trabajos Bocamina o inclinado La Linda Nueva: corresponde a un inclinado de 45° en desarrollo para conectar la labor principal y transportar mineral con malacate. El segundo trabajo minero Bocamina La Linda: cruzada de dirección N45°E y longitud aproximada de 52 m; esta cruzada conecta a la guía principal de trabajo con longitud aproximada de 60 m en dirección S134°E. |
| FORMA DE VENTILACIÓN | Natural. |
| SOSTENIMIENTO | La sección del túnel en promedio en 4 m ² La cruzada inicia con puerta alemana instalada cada metro durante los siete (7) metros, posteriormente se encuentra una roca de caja porfirítica que permite el sostenimiento de manera natural. |
| FORMA DE ARRANQUE | Herramientas manuales, martillos, fracturamiento de roca con herramientas artesanales. |
| CARGUE Y TRANSPORTE | Transporte en carretas o buguies, hasta el nivel patio donde se empaca en costales de 50-80 kilos que se transportan en mulas (Equus) para su comercialización. |
| ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS | El material estéril es acopiado en las laderas. |
| No DE PERSONAS VINCULADAS | 4. |
| PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO | Se referencia: aprox 10 ton/sem. En esta mina no se realiza beneficio de mineral solo concentrado de minerales. |

| | |
|--------------------------------------|--|
| PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL | Pequeña explotación minera Puertaguadua. |
| VEREDA | Sabaletas- Frontino Bajo. |
| LABORES DE DESARROLLO | Sin desarrollar. Acceso por sendero. |
| FORMA DE EXPLOTACIÓN | Cielo abierto, monitor artesanal o lavado a presión de talud. |
| FORMA DE VENTILACIÓN | No se utiliza. |
| SOSTENIMIENTO | Talud con socavación en las bases. |
| FORMA DE ARRANQUE | Energía hidráulica: agua a presión para lavar el talud. Herramientas manuales: manguera, picas, palas. |
| CARGUE Y TRANSPORTE | El material cae por gravedad directamente a un canalón para concentración de mineral por gravedad. |
| ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS | Erosión de talud, pendientes negativas posteriormente pueden colapsar. |
| No DE PERSONAS VINCULADAS | 2. |
| PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO | Se referencia una recuperación de 2-4 gr de oro /semana. |

Fotografía 5.1. Mujeres en oficio de chatarreras seleccionando el material y bocamina La Poderosa. Fuente: autores.



5.2.2. ASPECTOS MINEROS DEL MUNICIPIO DE ALMAGUER (CAUCA)

En el municipio de Almaguer se ha desarrollado la explotación de oro desde la época de la colonia. La actividad fue tan importante que hasta en el himno municipal se hace referencia a esta actividad.

Las minas visitadas en Almaguer se encuentran en la vereda Ruiz, donde una asociación minera adelanta el proceso para que sea declarada y legalizada área de reserva especial para los mineros artesanales.

Las características de las explotaciones mineras visitadas en el municipio de Almaguer son las siguientes:

| | |
|--------------------------------------|---|
| PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL | Mina Artesanal Mateguadua. |
| VEREDA | Ruiz. |
| LABORES DE DESARROLLO | Carretable en desarrollo y sendero para acceso a la mina. |
| FORMA DE EXPLOTACIÓN | La explotación se realiza siguiendo las venas mineralizadas en diversas direcciones por medio Se cuenta con una cruzada de longitud 80m guías, y tambores. La mineralización está en zona de cizalla, se observaron venas con buzamientos entre 20-30° al sur y azimut entre 108° -120°. |
| FORMA DE VENTILACIÓN | En la mina se utiliza un ventilador soplante con motor de 6hp y tubería en pvc. |
| SOSTENIMIENTO | El sostenimiento principalmente es natural, en roca de caja esquistos carbonosos que se han comportado estables. Sin embargo, con el avance de las actividades mineras y el incremento de las presiones, este tipo de roca puede presentar fallamientos debido a su propia naturaleza en foliación y a la humedad, por lo que se recomienda implementar el sostenimiento en las labores Se encuentran tramos con alturas de 1.50 m, sección de 2.64 m ² . la sección mínima debe ser de 3m ² . Altura mínima 1,80m. |
| FORMA DE ARRANQUE | Se utilizan herramientas manuales, martillos, fracturamiento de roca con herramientas artesanales. |
| CARGUE Y TRANSPORTE | El cargue y transporte de mineral se realiza por medios manuales y carretas. |
| ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS | Los materiales estériles son acopiados a las laderas, lo cual genera impactos visuales, sobre el suelo y las escorrentías. |
| No DE PERSONAS VINCULADAS | 10 mineros. |
| PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO | Se reportan: 6 ton/semana. |

| | |
|--------------------------------------|---|
| PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL | Mina Artesanal Palo verde |
| VEREDA | Ruiz. |
| LABORES DE DESARROLLO | Carreteable en desarrollo y sendero para acceso a la mina. |
| FORMA DE EXPLOTACIÓN | Explotación por guías, tambores e inclinados. Se cuenta con una cruzada con longitud de 100m, a los 70m se encuentra un inclinado de acceso a una sobre guía donde se desarrolla la explotación. |
| FORMA DE VENTILACIÓN | Ventilación Artificial. ventilador tipo búfalo sobre la bocamina. Este genera un sonido que se encapsula lo cual genera altos niveles sonoros en la mina, por lo cual se recomienda la reubicación de este equipo. |
| SOSTENIMIENTO | Medias puertas en algunos tramos de la cruzada y en otros se deja sostenimiento natural. Se recomienda entibar todas las labores mineras debido a que la roca encajante corresponde a esquistos carbonosos que puede presentar fallamientos. La sección de la cruzada se encuentra alrededor de 2.7 m ² . La sección mínima debe ser de 3m ² . Altura mínima 1,80m. |
| FORMA DE ARRANQUE | Se utilizan herramientas manuales y martillos, fracturamiento de roca con herramientas artesanales. |
| CARGUE Y TRANSPORTE | La explotación tiene un inclinado con ancho de 1.50 m. dividido en dos secciones uno de 0,70m para transporte de material con un malacate artesanal y 0,80 m para el acceso del personal. |
| ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS | Los materiales estériles son arrojados a las laderas, lo cual genera impactos visuales, sobre el suelo y las escorrentías. |
| No DE PERSONAS VINCULADAS | 10 mineros. |
| PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO | 6 ton/sem. |

5.2.3. ASPECTOS MINEROS DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR (CAUCA)

En el municipio de Bolívar, la actividad minera de oro se concentra en el sector denominado Cerro Gordo. Los mineros tradicionales están organizados en una asociación, se cuenta con título minero CAO-152 y adelantan un proceso de formalización minera. El acceso se hace por sendero y las explotaciones se encuentra distantes. De esta zona solamente se identificaron aspectos mineros de la explotación denominada Monterrucio. Sus características son las siguientes:

Sistema y método de explotación. El sistema de explotación no se encuentra definido. Se informó que se presentó un deslizamiento que obstaculizo el ingreso a todas las labores. Solo se ingresó en unos tramos. Se identificaron labores exploratorias. Se informó que la explotación se desarrolla por guías y tambores. Se ingresó por una guía de 94 m de longitud. La mineralización presenta una veta irregular con dirección N70W y buzamiento 65SW.

- Descripción del método de arranque. El arranque se realiza mediante el uso de herramientas manuales y fracturamiento de roca con herramientas artesanales.
- Descripción del sostenimiento minero. La roca encajante corresponde a esquistos carbonosos y cuarzos silicificados, por lo que presenta estabilidad; sin embargo, hay zonas de falla que requieren entibación.

Descripción del tipo de ventilación. La ventilación se realiza de manera natural. Debido a que se encontraron labores derrumbadas, se interrumpe el circuito de aire.

Descripción del cargue y transporte de material. Se realiza de manera manual, con baldes, costales y katan-gas (amarre artesanal utilizado para transportar costales en la espalda del minero).

Consideraciones técnicas seguridad minera. Actualmente la galería principal tiene altura de 1,60 m. Para facilitar el transporte de materiales, herramientas y personal en las labores de transporte la altura será mínimo de 1,80 m, con sección de 3 m².

Aspectos ambientales mineros. En los alrededores de la bocamina se acumula el material estéril.

En la zona se construyó una planta de beneficio mediante cianuración para beneficiar el mineral que extraen los mineros tradicionales. Sin embargo, la planta no ha comenzado a operar y la zona no cuenta con vía de acceso.

5.3. ANÁLISIS MINERO

Fotografía 5.2. Tambor de acceso al frente de explotación y minero en el municipio de La Sierra. Fuente: autores.



Fotografía 5.3. Sostenimiento artificial y malacate artesanal en el municipio de Almaguer. Fuente: autores.



Fotografía 5.4. Sostenimiento con puerta alemana en Almaguer y montaje inactivo para cianuración en el municipio de Bolívar. Fuente: autores.



En las zonas mineras estudiadas de los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar se identificaron mineralizaciones de oro de tipo vetiformes y corredores mineralizados en zonas de cizalla, ambos asociados a cuerpos intrusivos que afectan rocas sedimentarias terciarias y rocas metamórficas paleozoicas.

Las condiciones geológicas de cada veta determinan la elección del método de explotación, debido a que se debe estudiar de manera detallada 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 de las vetas.

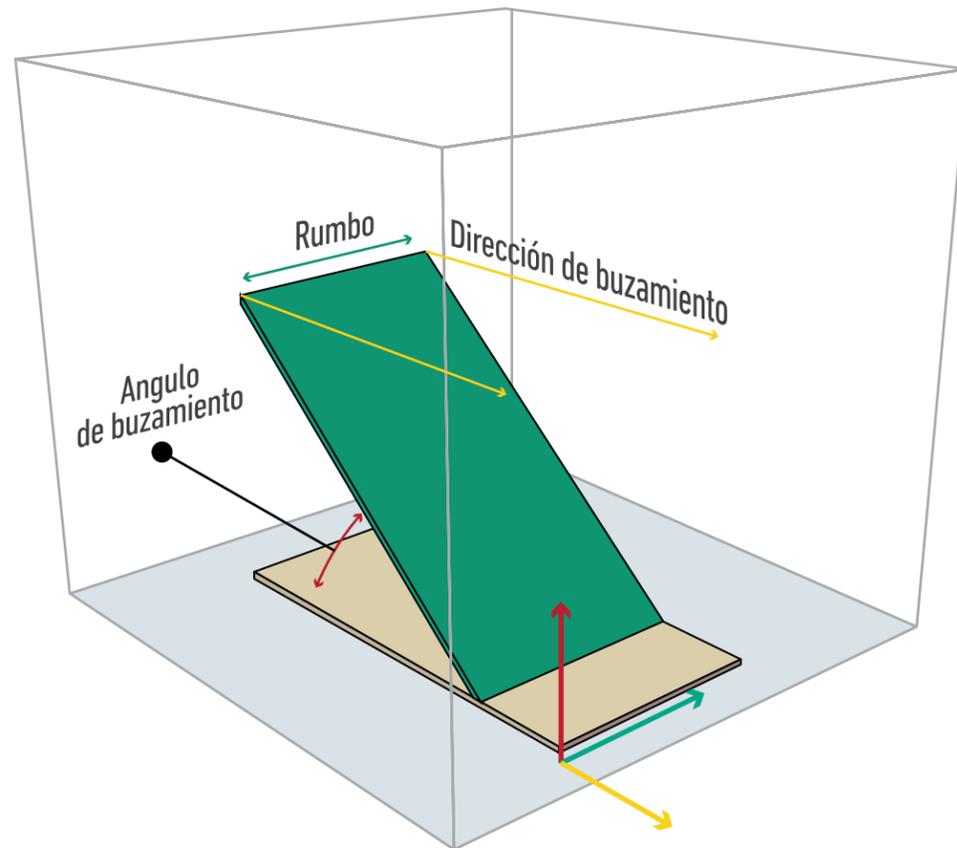
En el presente proyecto se tomaron datos de un punto muestreado de la veta de cada mina, en la que se midió el rumbo, buzamiento y se definieron algunas características geológicas y mineralógicas, lo cual se describe en el capítulo geológico. Estos datos puntuales no permiten establecer el comportamiento de los yacimientos, debido a que se requieren estudios más específicos. Sin embargo, para efectos del análisis del método de explotación, se realizó una proyección inferida de los datos tomados en las minas en cuanto a rumbo y buzamiento para visualizar métodos que se pueden desarrollar en las minas artesanales de pequeña escala (MAPE) enfocados hacia una minería formalizada, tecnificada, racional y rentable.

Para determinar la continuidad, estructura, geometría de la veta es necesario realizar estudios exploratorios detallados con perforaciones, análisis geológicos y de laboratorio, esta información es relevante en la determinación de los recursos y reservas, así como la definición del método de explotación en el programa de trabajos y obras minero

En la figura 5.10 se esquematiza la proyección inferida de un punto de una veta en rumbo y buzamiento, como ejemplo para visualizar las proyecciones que se pretenden esquematizar de los datos puntuales con que se cuenta.

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

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



5.3.1. PROYECCIONES INFERIDAS PARA LA EXPLOTACIÓN MINERA EN EL MUNICIPIO DE LA SIERRA

En las minas de la vereda Frontino del municipio de La Sierra, se identificaron vetas con buzamientos casi verticales (entre 70-85° NE, SE), encajadas en rocas ígneas andesíticas, dacíticas porfiríticas y se presentan brechas magmáticas. En la siguiente tabla Se relacionan los puntos medidos de rumbos y buzamientos de las minas muestreadas y en la figura se presenta un esquema en proyección inferida de la Mina artesanal en pequeña escala (MAPE) La Poderosa.

Figura. 5.17. Proyecciones inferidas para la explotación minera en el municipio de La Sierra. Fuente: datos recopilados por el Grupo de Geología de esta investigación.

| MINA | MUNICIPIO | RUMBO | BUZAMIENTO | ALTITUD (m) | ROCA DE CAJA |
|-----------------|-----------|---------------------------|---------------------------|-------------|---|
| LA PODEROSA | La Sierra | N40°E | 90° | 1391 | Pórfido andesítico |
| LAS CHATARRERAS | La Sierra | Azimet 120° | 90° | 1368 | Pórfido andesítico |
| LA LINDA | La Sierra | azimet de 134 ° | 90° | 1358 | Pórfido andesítico |
| LA MINA | La Sierra | N50E | 50NW | 1234 | Roca ígnea de composición cuarzo-diorítica y una brecha magmática compuesta de fragmentos de roca dacítica. |
| PUERTA GUADUA | La Sierra | - | - | 1295 | Pequeña explotación a cielo abierto. cuerpo granitoide uniforme profundamente meteorizado. Se explota el horizonte B de suelo enriquecido en óxidos de hierro y cuarzo. |
| LA PALMA | La Sierra | Mineralización diseminada | Mineralización diseminada | 1366 | Andesita porfirítica en zona de brecha intrusiva. Fuertemente meteorizada |
| MINA VIEJA | La Sierra | N30W | 90 | 1372 | Andesita porfirítica. Fuertemente meteorizada |
| EL HATO | La Sierra | N40°W | 85°SW | 1211 | Andesita porfirítica. Fuertemente meteorizada |

En la vereda Frontino Bajo sector quebrada Sabaletas, se encuentra una explotación en superficie que arranca el mineral mediante uso de agua a presión y mangueras. El mineral corresponde a un cuerpo granitoide uniforme profundamente meteorizado con diferenciación clara de los horizontes A y B, donde se explota el horizonte B de suelo enriquecido. Esta actividad lava los horizontes del suelo y subsuelo y se van dejando surcos y erosión, por lo que es necesario pensar en utilizar técnicas más adecuadas para aprovechamiento de mineral y estabilización de taludes. Sin embargo, se requiere realizar estudios geológicos detallados para definir la mineralización y poder establecer un método de explotación que genere mayor rentabilidad y menor daño ambiental.

5.3.2. PROYECCIONES INFERIDAS PARA LA EXPLOTACIÓN MINERA EN EL MUNICIPIO DE ALMAGUER

En el Municipio de Almaguer, vereda Ruíz y Moras, se identificaron zonas de cizalla con delgadas vetas que oscilan en dirección NW, NE y buzamientos que oscilan entre 25-35°NE , 35°NW , 18NW, 40- 60 °SE, 20,30 SW, la roca de caja corresponde a esquistos carbonosos y grafitosos y en sectores las veta se encuentran encajadas en esquistos cuarzo-micáceos deformados. En algunas zonas se presentan vetas con geometría en rosario.

Figura 5.18. Proyección inferida de veta a partir de una medición de un punto de rumbo y buzamiento. Mina Artesanal La Poderosa. Rumbo N40°E y buzamiento vertical. filón de cuarzo-carbonatos de 1.7 m en su parte más ancha (geometría en rosario) venillas laterales de 5 a 10 cm. Roca de caja Porfido andesítico con leve metamorfismo. Fuente: autores.

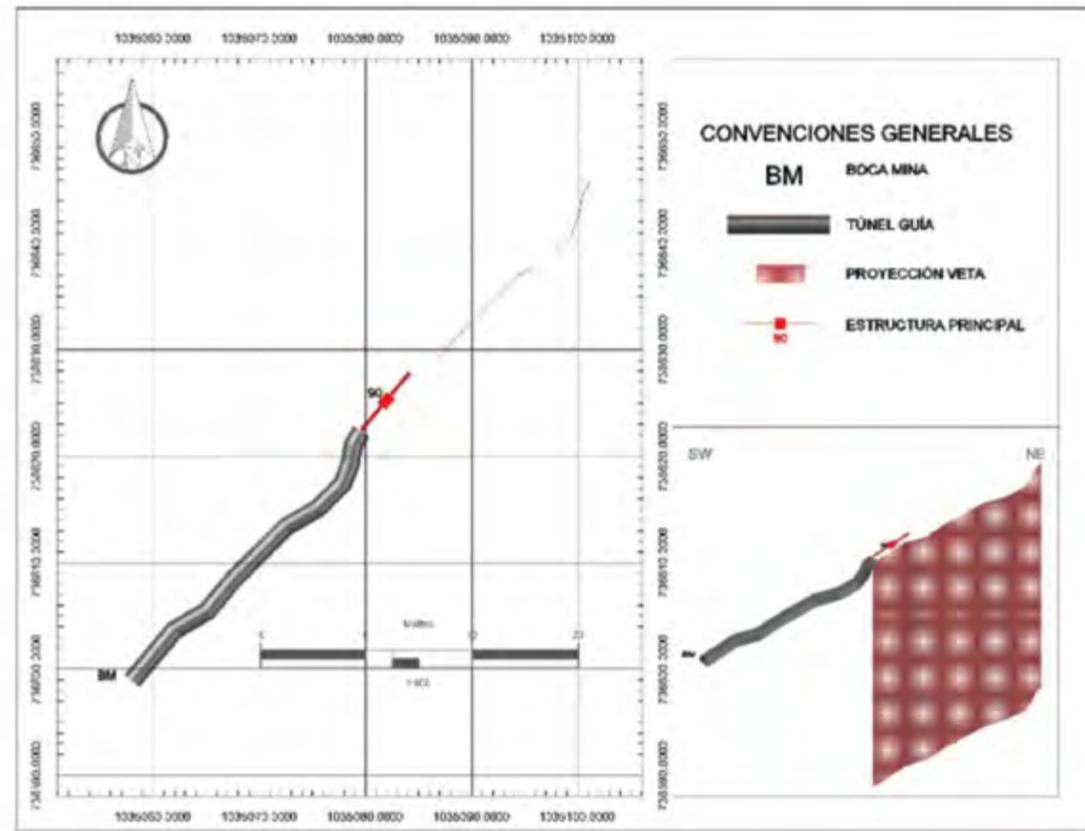
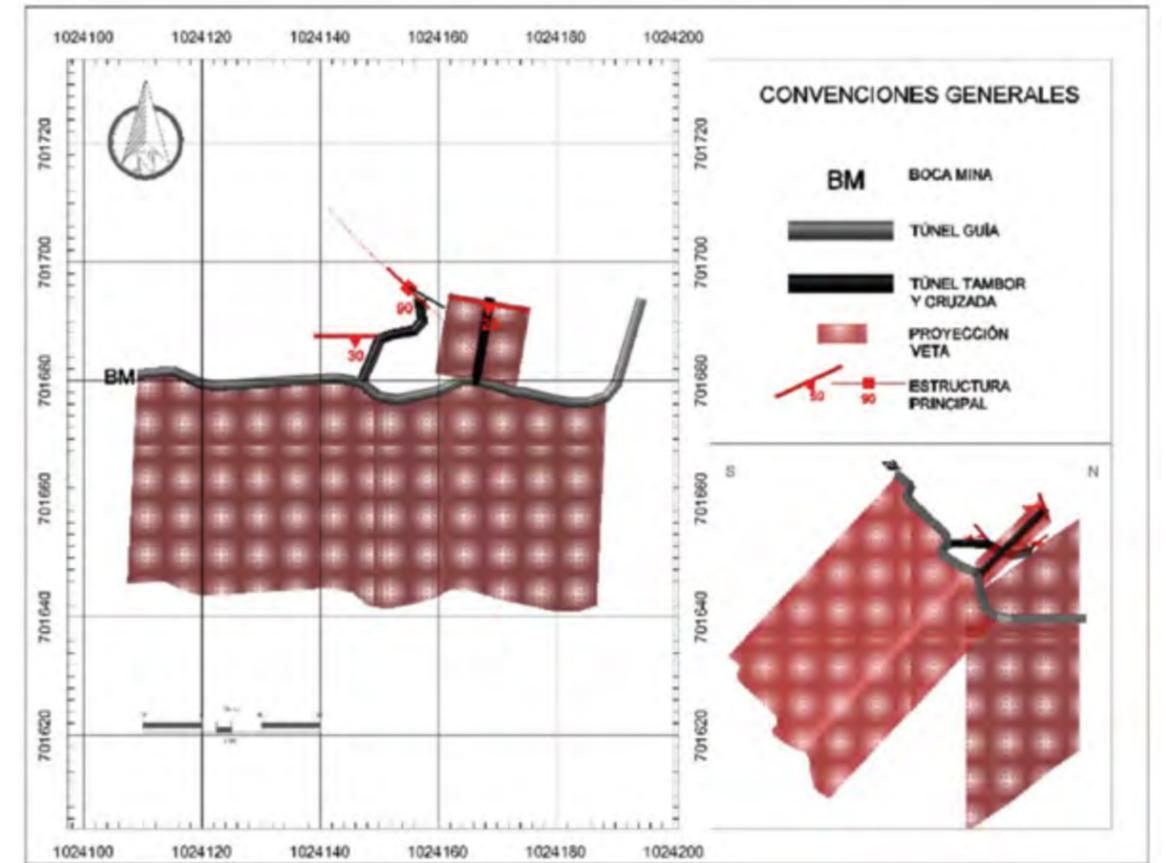


Figura. 5.19. Rumbo y Buzamiento de un punto de veta explotaciones mineras artesanales Municipio de Almaguer Fuente: autores.

| MINA | MUNICIPIO | RUMBO | BUZAMIENTO | ALTITUD (m) | ROCA DE CAJA |
|----------------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|-------------|---|
| ARRAYANES | Almaguer | N70E | 18NW | 1945 | Esquistos carbonosos y grafitosos |
| RASTRA 1 | Almaguer | N15W | 25 NE | 1913 | Esquistos carbonosos y grafitosos |
| RASTRA 2 | Almaguer | N20W | 30 NE | 1924 | Esquistos carbonosos y grafitosos |
| RASTRA LA PRUEBA | Almaguer | N40°E | 35°NW | 1889 | Meta sedimentos fuertemente silicificados |
| LA PEÑA | Almaguer | N87E | 60S | 1902 | Esquistos carbonosos y grafitosos |
| PALOVERDE | Almaguer | rumbo este-oeste, 108 en azimut | 20 – 30° S | 1793 | Esquistos carbonosos y grafitosos |
| MATEGUADUA | Almaguer | NE, azimut 108° | 20- 30°S | 1740 | Esquistos carbonosos y grafitosos |
| EL HIGUERON-EL BALSÓ | Almaguer | N65°E y N90E | 40°-y 50° hacia el SE | 1666 | Esquistos carbonosos y grafitosos |

Figura 5.20. Proyección inferida de veta a partir de una medición de un punto de rumbo y buzamiento. Mina Artesanal Matadeguadua. La roca de caja es un esquisto negro carbonoso replegado en zonas de cizalla que desarrollan lentes o zonas vetiformes. Azimut 108° buzando 20-30° al sur. Fuente: autores.



5.3.3. PROYECCIONES INFERIDAS PARA LA EXPLOTACIÓN DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR

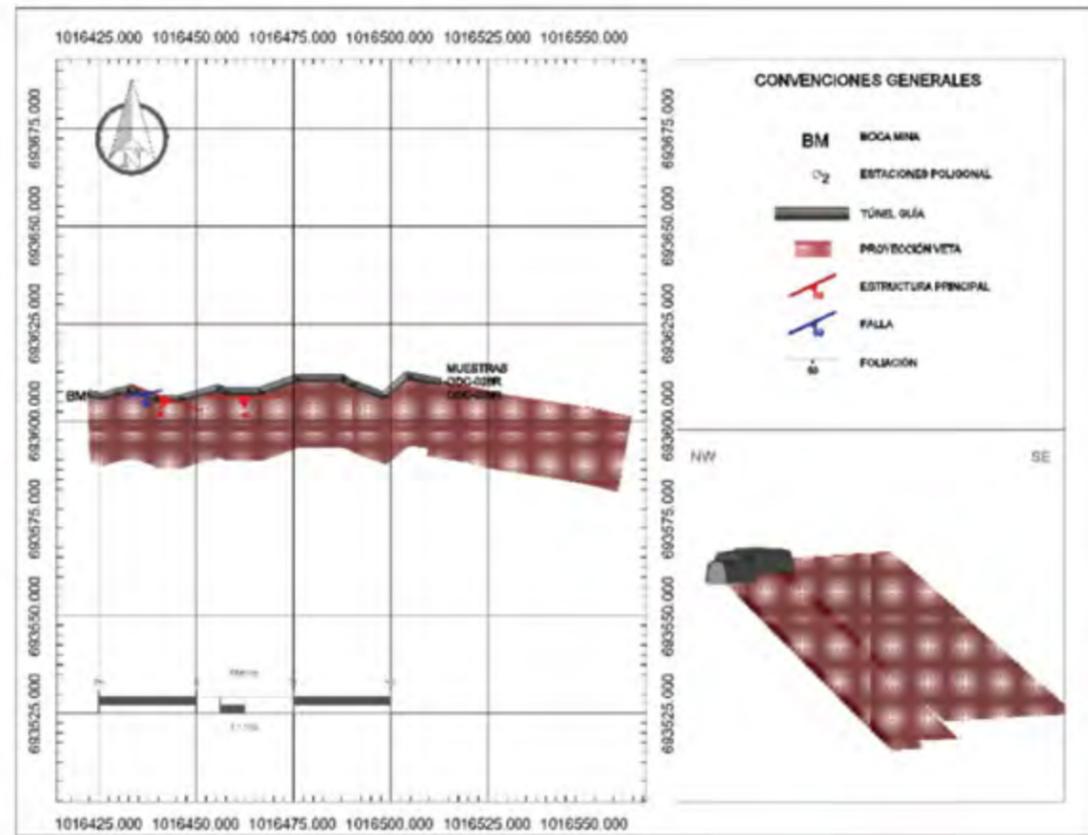
En el Municipio de Bolívar, vereda Monterusio -Cerro gordo, se identificaron mineralizaciones con buzamientos entre 65°- 58°SW en vetas delgadas irregulares y zonas de brechas hidrotermales.

Roca encajante esquisto grafitosos con zonas de brecha como un típico contacto intrusivo, rocas esquistos sericiticos silicificados y rocas ígneas de textura fanerítica.

Figura. 5.21. Proyecciones inferidas para la explotación minera en el municipio de Bolívar. Fuente: datos recopilados por el Grupo de Geología de esta investigación.

| MINA | MUNICIPIO | RUMBO | BUZAMIENTO | ALTITUD (m) | ROCA DE CAJA |
|------------------|-----------|-------|------------|-------------|---|
| MONTERUSIO | Bolívar | N70°W | 65° al SW | 2215 | Esquistos cuarzo-sericiticos, carbonosos y pórfido andesítico |
| AGUJA DEL ÁGUILA | Bolívar | N20W | 58SW | 2111 | Pórfido dacítico |

Figura 5.22. Proyección inferida de veta a partir de una medición de un punto de rumbo y buzamiento. Pequeña explotación Monterusio, N70°W buzando 65° al SW. Fuente: autores.



5.4. CONSIDERACIONES MINERAS

5.4.1. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

Para mejorar la producción en las pequeñas explotaciones se requiere contar con la formalización de la actividad y la generación de un proyecto minero el cual parte de las características geológicas del yacimiento mineral, tamaño, la forma, el grado de mineralización, los recursos, las reservas y la factibilidad del mismo.

Una vez se dé inicio al proyecto minero se realiza el programa de trabajos y obras donde se hace el planeamiento de la explotación y se establece el método de explotación.

La definición del método de explotación se basa en las características geométricas, la orientación del yacimiento, rumbo, buzamiento, resistencia de roca, tenor y los factores económicos que influyen sobre la ejecución del proyecto minero.

Actualmente las pequeñas explotaciones y minas artesanales visitadas en este estudio siguen la mineralización a través de guías y tambores o clavadas y en labores antiguas ya intervenidas se desarrollan cruzadas para encontrar la veta más amplia, donde se realiza una explotación selectiva del mineral y del estéril.

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 5.23. Métodos de explotación según el tipo de mineralización, buzamiento y resistencia de la mena y roca encajante (sistema de Boshkov y Wright). Fuente: Handbook.

| 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 |
| 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 |
| | | Fuerte | Fuerte | Cámaras abiertas Corte y relleno |
| | Débil | Fuerte | Espacios con sostenimiento cuadrado | |
| | Débil | Débil | Espacios con sostenimiento en cuadros | |

Para seleccionar un método de explotación hay diversos sistemas cuantitativos, como cualitativos. Debido a que no se cuenta con suficiente información para proyectar un planeamiento de mina se seleccionó un método cualitativo que permitiera proyectar la explotación. Entre los métodos cualitativos se encuentra el sistema de Boschkov y Wright (1973) tomado de SME 2011. Este sistema se basa en la potencia e inclinación del cuerpo mineralizado y la resistencia del macizo rocoso. Como se observa en la figura 5.23.

La composición mineralógica, el tamaño del grano, el grado de metamorfismo y la historia tectónica son factores que desempeñan un rol en las características del macizo rocoso para definir la resistencia de la roca y realizar diseños mineros de detalle se deben desarrollar ensayos de laboratorio que permitan obtener valores confiables.

De manera general se pueden definir características de la roca en campo mediante el uso de la clasificación según Hoek E & Brown E. T. (2007) para la estimación en terreno de la resistencia de rocas por compresión uniaxial, sin embargo, no exonera de la elaboración de análisis de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión uniaxial de la roca y los estudios geo-estructurales.

En el Municipio de la Sierra, en las minas de la vereda Frontino, en las explotaciones pequeñas como El triunfo, Las Chatarreras, Mina Artesanal La Linda y La Poderosa se identificaron puntos donde las vetas presentaban direcciones NE, NW y con buzamientos que oscilan entre casi verticales entre 70-85° NE, SE y algunos con 50°, Encajadas en rocas ígneas andesíticas, dacíticas porfiríticas y se presentan brechas intrusivas. Estas rocas pueden establecerse como rocas resistentes a moderadamente resistentes donde se pueden implementar métodos de explotación como resuing (extracción selectiva), cámaras con sostenimiento, corte y relleno.

Figura 5.24. Análisis inferido de posibles métodos de explotación que se podrían implementar en las explotaciones de las zonas visitadas Municipios de la Sierra. Fuente: Handbook

| TIPO DE MINERALIZACIÓN | BUZAMIENTO | RESISTENCIA DE LA MENA MINERALIZADA | RESISTENCIA DE LA ROCA DE CAJA | MÉTODO DE MINERÍA COMÚNMENTE APLICADO | MUNICIPIO DE LA SIERRA |
|------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| Venas muy delgadas | Inclinado | Débil o fuerte | Débil o fuerte | Resuing (explotación selectiva) | En las minas visitadas las vetas presentan buzamiento con fuerte inclinación y rocas de caja resistentes a moderadamente resistentes |
| | Inclinado | Fuerte | Fuerte | Cámaras abiertas | |
| | Inclinado | Débil | Fuerte | Corte y relleno | |
| | Inclinado | Débil | Débil | cámaras con sostenimiento cuadrado | |
| | inclinado | Débil | Débil | cámaras con sostenimiento en cuadros | |

En el Municipio de Almaguer se identificaron zonas de cizalla con delgadas vetas que oscilan en dirección NW, NE, EW y buzamientos que oscilan entre 25-35°NE, 35°NW, 18NW, 40- 60 °SE, 20,30 SW, la roca de caja corresponde a esquistos carbonosos y grafitosos y en sectores las veta se encuentran encajadas en esquistos cuarzo-micáceos deformados. En algunas zonas se presentan vetas con geometría en rosario.

Según el análisis preliminar de los métodos de explotación, para venas delgadas en buzamientos inclinados que podrían implementarse son Resuing, Cámaras con sostenimiento en cuadros, cámaras y pilares, corte y relleno.

Debido a que la zona de Almaguer la roca de caja presenta esquistos carbonosos y cuarsosericíticos es importante rellenar con el material estéril las cavidades abandonadas posteriores a la explotación e implementar entibación.

Figura 5.25. Análisis inferido de posibles métodos de explotación que se podrían implementar en las explotaciones de las zonas visitadas Municipio de Almaguer. Fuente: Handbook

| TIPO DE MINERALIZACIÓN | BUZAMIENTO | RESISTENCIA DE LA MENA MINERALIZADA | RESISTENCIA DE LA ROCA DE CAJA | MÉTODO DE MINERÍA COMÚNMENTE APLICADO | MUNICIPIO DE ALMAGUER |
|------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------|--|--|
| Venas muy delgadas | Inclinado | Débil o fuerte | Débil o fuerte | Resuing | En las minas visitadas las vetas presentan buzamiento con inclinación suave y rocas de caja moderadamente resistentes a débiles. |
| | Horizontal | Fuerte | Fuerte | Cámaras abiertas con pilares ocasionales | |
| | Inclinado | Fuerte | Fuerte | Cámaras y pilares | |
| | Inclinado | Débil | Fuerte | Cámaras abiertas | |
| | Inclinado | Débil | Débil | Corte y relleno | |
| Venas delgadas | Inclinado | Débil | Fuerte | Cámaras con sostenimiento cuadrado | |
| | Inclinado | Débil | Débil | Cámaras con sostenimiento en cuadros | |

En el Municipio de Bolívar se identificaron mineralizaciones con dirección NW, SW y buzamientos entre 65°SW, 58°SW en vetas delgadas irregulares y zonas de brechas hidrotermales. Roca encajante esquistos grafitosos con zonas de brecha como un típico contacto intrusivo, rocas esquistos sericiticos silicificados y rocas ígneas de textura fanerítica.

Los métodos de explotación que podrán ajustarse a este tipo mineralizaciones de venas delegadas en buzamientos inclinados son Resuing, y Cámaras con sostenimiento en cuadros. También puede implementarse el método de corte y relleno en roca competente.

Figura 5.26. Análisis inferido de posibles métodos de explotación que se podrían implementar en las explotaciones de las zonas visitadas Municipio de Bolívar. Fuente: Handbook

| TIPO DE MINERALIZACIÓN | BUZAMIENTO | RESISTENCIA DE LA MENA MINERALIZADA | RESISTENCIA DE LA ROCA DE CAJA | MÉTODO DE MINERÍA COMÚNMENTE APLICADO | MUNICIPIO DE BOLÍVAR |
|------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| Venas muy delgadas | Inclinado | Débil o fuerte | Débil o fuerte | Resuing | En las minas visitadas las vetas presentan buzamiento con inclinación y rocas de caja moderadamente resistentes a débiles. |
| | Inclinado | Fuerte | Fuerte | Cámaras abiertas | |
| | Inclinado | Débil | Fuerte | Corte y relleno | |
| | Inclinado | Débil | Fuerte | cámaras con sostenimiento cuadrado | |
| | inclinado | Débil | Débil | cámaras con sostenimiento en cuadros | |

5.4.2. SOSTENIMIENTO

En las zonas visitadas, la mayoría de las explotaciones tienen sostenimiento natural debido a que la roca ha mostrado competencia, sin embargo en sectores de buena mineralización se amplían las galerías y bóvedas lo que puede ocasionar amenazas de desplome. Por situaciones como esta es importante estudiar las condiciones geomecánicas de las rocas de las explotaciones mineras puesto que algunas son muy incompetentes como es el caso de los esquistos carbonosos que se presentan en los municipios de Almaguer o zonas de fallamiento en la Sierra y Bolívar.

La antigüedad de las explotaciones estudiadas y las condiciones hidroclimáticas hacen que la madera empleada para el sostenimiento se descomponga y las presiones internas laterales y de techo condicionan el sostenimiento a que se deforme o a que se rompan las puertas instaladas. Esta situación conlleva a realizar cambios de madera y aumentar la densidad o disposición de puertas entre 0.5m y 1.0 m especialmente en las zonas de inestabilidad o mayor presión.

Por otro lado después de las voladuras queda material suelto en el techo cuya remoción se realiza con posterioridad o se acumula sobre las vías aumentando la posibilidad de desplomes y de obstrucción de los frentes de explotación, lo que hace necesario que se realice el proceso de desabombar el techo de material suelto.

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 estu-

dios 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

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 3 m²
- 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 5.27. 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 5.27. Sostenimiento de puerta alemana sección mínima 3 m². Altura mínima 1.80m. Fuente: autores.



5.4.3. VENTILACIÓN

En las minas visitadas en los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar, la ventilación principalmente se realiza de manera natural y en algunas minas artesanales se han instalado ventiladores soplantes tipo bufalo de baja capacidad, cuya operación resulta insuficiente para garantizar una buena atmósfera minera para el personal, durante el desarrollo de las operaciones de arranque, voladuras, carga y transporte.

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 lo 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 atmósfera normal.

La temperatura y humedad influyen en la jornada laboral del personal por lo cual esta se puede controlar con la ventilación. La temperatura máxima efectiva para el trabajo sin restricción en la jornada laboral es de 29°C, de esta en adelante hay restricciones.

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.

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, estas aguas requieren ser analizadas para determinar si el vertimiento directo a las quebradas afecta las condiciones naturales de estas.

5.5. CONCLUSIONES EN ASPECTOS MINEROS

- La actividad minera estudiada de los municipios de La Sierra, Bolívar y Almaguer corresponde a pequeñas explotaciones y minas artesanales que se han desarrollado de manera poco profundas. Con la formalización y tecnificación de las actividades se obtendrá mayor producción y material para la planta de beneficio..
- El método de explotación preferido por los mineros es guías, tambores y clavadas los cuales se realizan en diversas direcciones siguiendo la mineralización y cuando esta cambia de dirección o no se encuentra, los mineros abandonan el frente en explotación e inician nuevas labores. Esta situación se debe a la escasa información que poseen los mineros respecto al tipo de mineralización, la geometría y su comportamiento.
- El sostenimiento de las explotaciones se ha realizado de manera auto sostenida y con puertas alemanas, sin embargo, al sostenimiento de la explotación es necesario darle importancia debido a que de este depende la seguridad del personal y la continuidad de las actividades en la mina.
- Generalmente el material extraído mena y estéril se lleva por medio de carretillas, malacates o garruchas hasta las teclas o tolvas, donde posteriormente son cargados los coches o vagonetas para trasladar el material hasta la superficie por carretillas, carrilera con vagoneta o por malacates artesanales o manuales (garruchas). En la explotación de las minas es importante llevar registro de control de la producción el que se basa en la cantidad de material que se extrae en los diferentes medios de transporte.
- En las zonas estudiadas de La Sierra, Bolívar y Almaguer para desarrollar los proyectos mineros en el marco de la sostenibilidad técnica, legal, financiera, social y ambiental, es básico continuar con los procesos de formalización y legalización de la actividad, para, así implementar los proyectos mineros donde se inicie con las etapa de exploración geológica, pre-factibilidad, factibilidad, construcción y desarrollo, explotación, beneficio y/o transformación, de manera que se cuente con un planeamiento minero que implemente las buenas practicas 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 comportamiento del mineral para establecer el método de minado, las metas de producción y se garantice un buen rendimiento de la producción para contar con material de 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

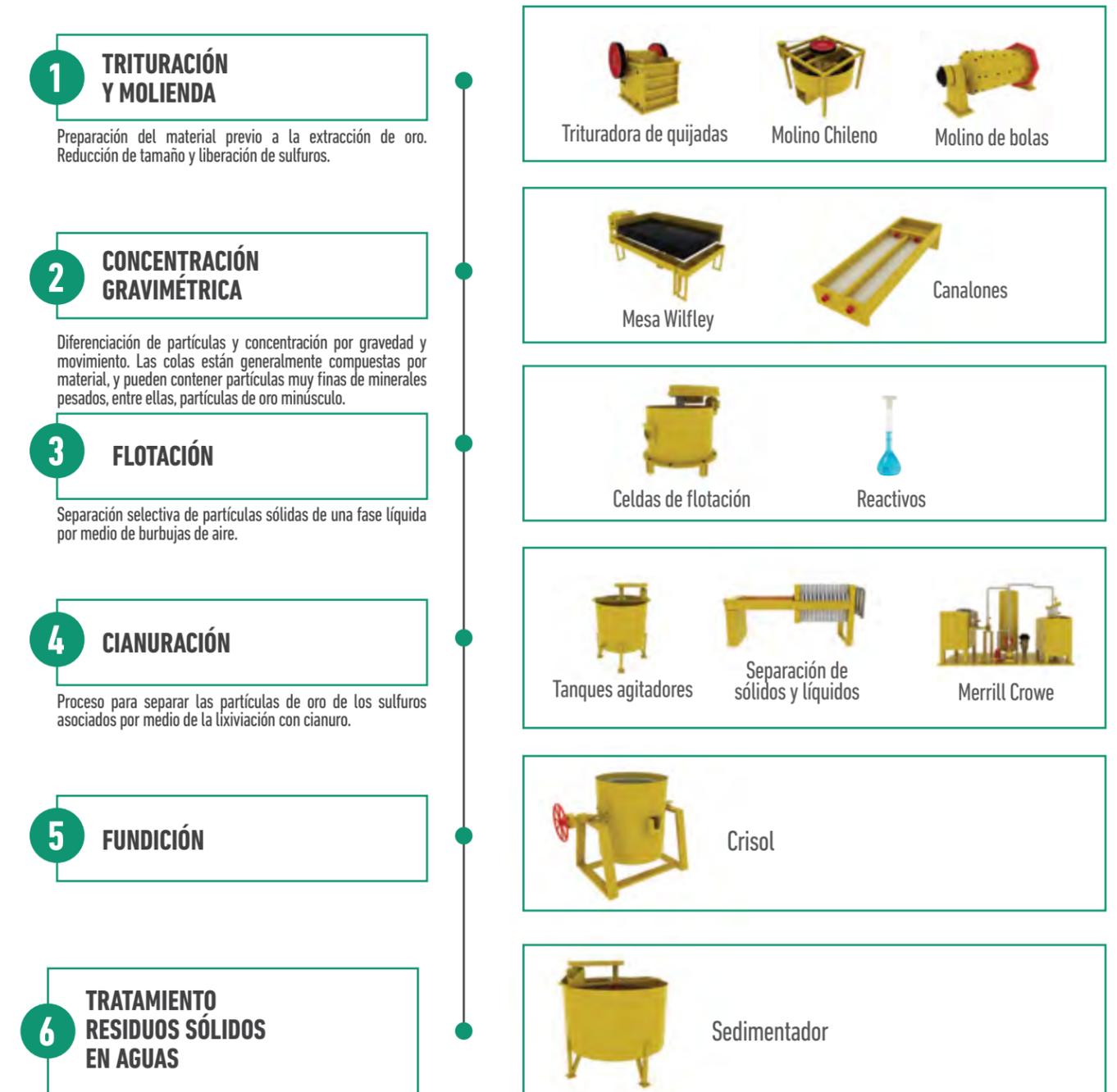
En este capítulo se muestran los diferentes aspectos metalúrgicos que se deben tener en cuenta, partiendo del conocimiento de las fases que comprende el proceso de beneficio y los principales equipos que realizan las operaciones unitarias.

Molino de bolas en planta Cooperativa Bolívar. Fotografía tomada por Fabián Ramírez, 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 y contribuye a disminuir en un gran porcentaje los costos operativos y de capital de cualquier planta de procesamiento mineral. Dicho porcentaje oscila entre 30 y 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 objetivos de la conminución pueden ser:

- 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.

Se puede definir la trituración como 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 por 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

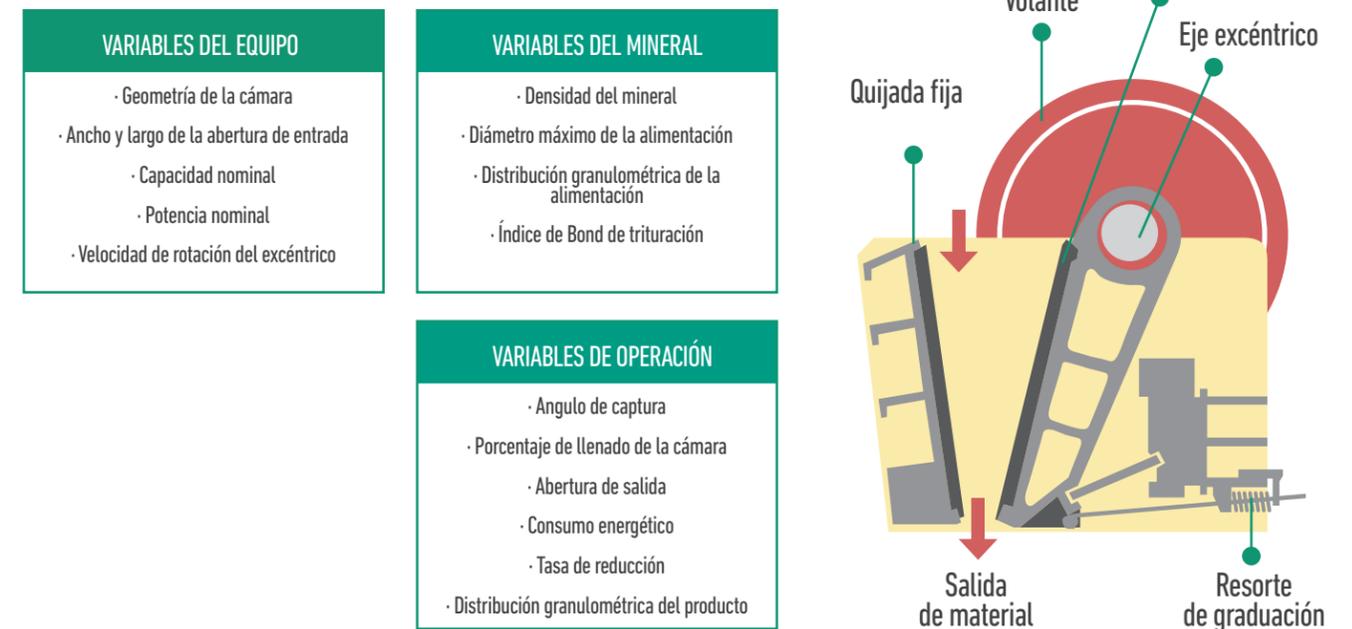
En la trituradora de quijadas, el mineral se fragmenta mediante compresión, en combinación con el clivaje, entre las superficies de las quijadas fija y móvil. La quijada móvil se aproxima (durante la marcha de trabajo) o se aleja (durante la marcha en vacío) de la quijada fija, al rotar el árbol excéntrico. 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 (Metso, 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.



Figura 6.3. Diagrama de funcionamiento de la trituradora de quijadas. Fuente: autores.



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.

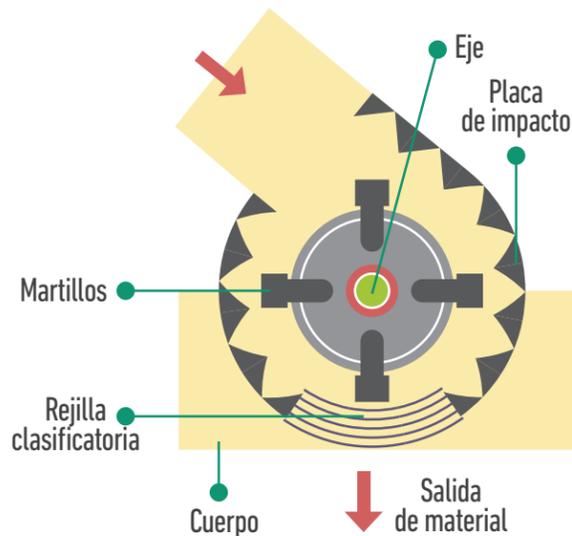
La entrada de la alimentación de la trituradora se sitúa en la parte superior, en un lateral con 45° respecto a la vertical; la salida del producto se encuentra en la parte inferior, y tiene una malla que clasifica el mineral que se encuentra en el tamaño adecuado. Las placas de choque, de acero al manganeso, 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-

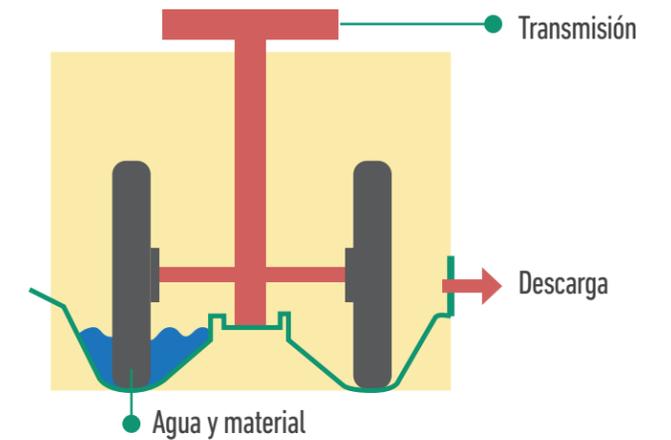
tende mantener el mineral siempre dentro del área de molienda, evitando así la dispersión o derrame. Esta operación contempla bajos costos de operación y mantenimiento, debido a la larga vida útil de sus componentes y la simplicidad de su funcionamiento (Velásquez, Veiga y Hall, 2010).

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 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

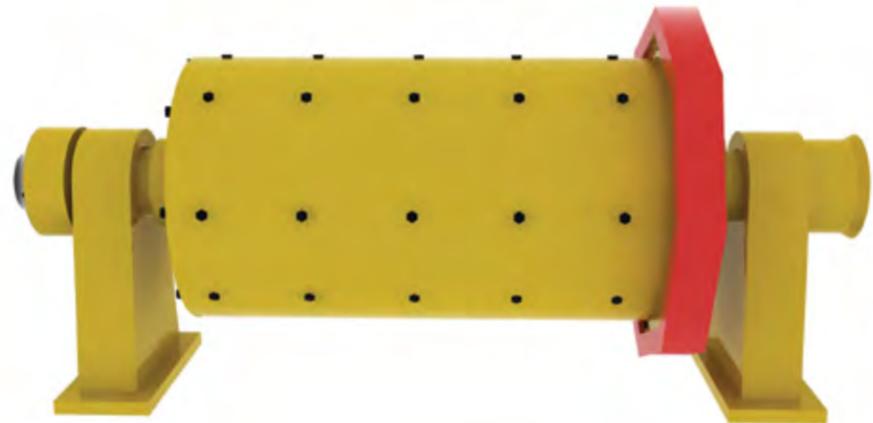
Es la operación final del proceso de conminución y consiste en reducir de tamaño partículas procedentes de la trituración media o fina (con fragmentos menores de 20 mm), hasta un tamaño que se encuentra en el rango de 28 a 200 mallas Tyler en la molienda gruesa, y menores de 325 mallas en la molienda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

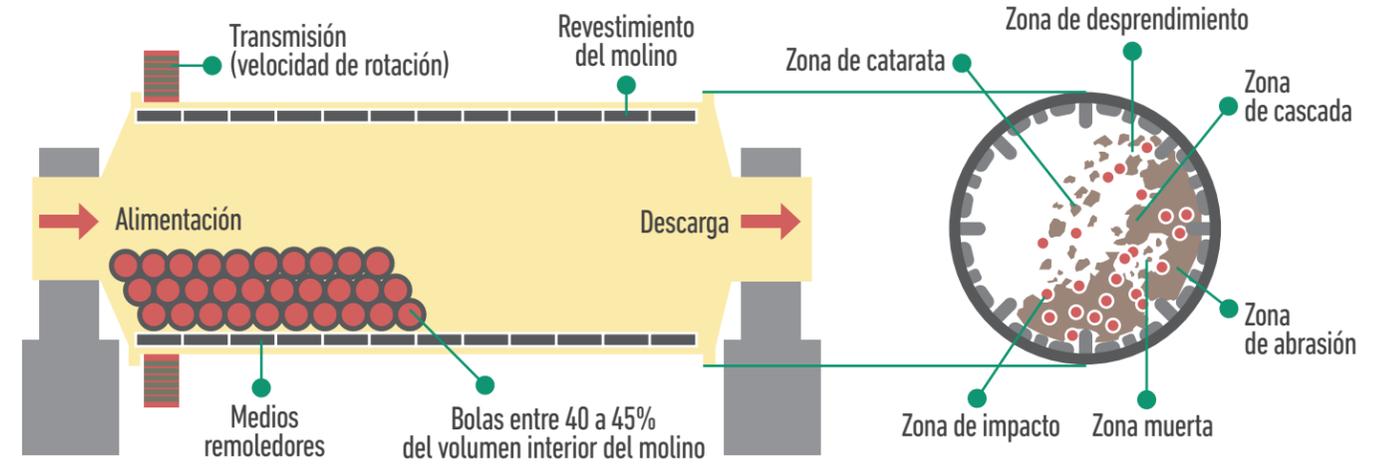
Molino de bolas

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

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:

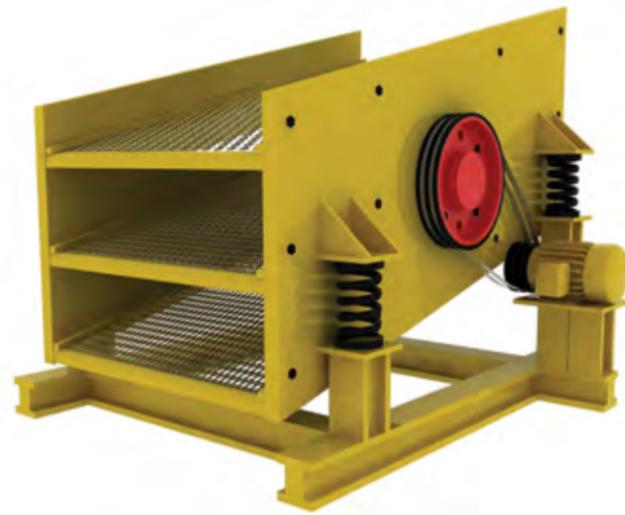
1. De las dimensiones de las partículas y del orificio del tamiz
2. De la forma de alimentación y de la posición de llegada a la superficie
3. De la inclinación de la superficie

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).

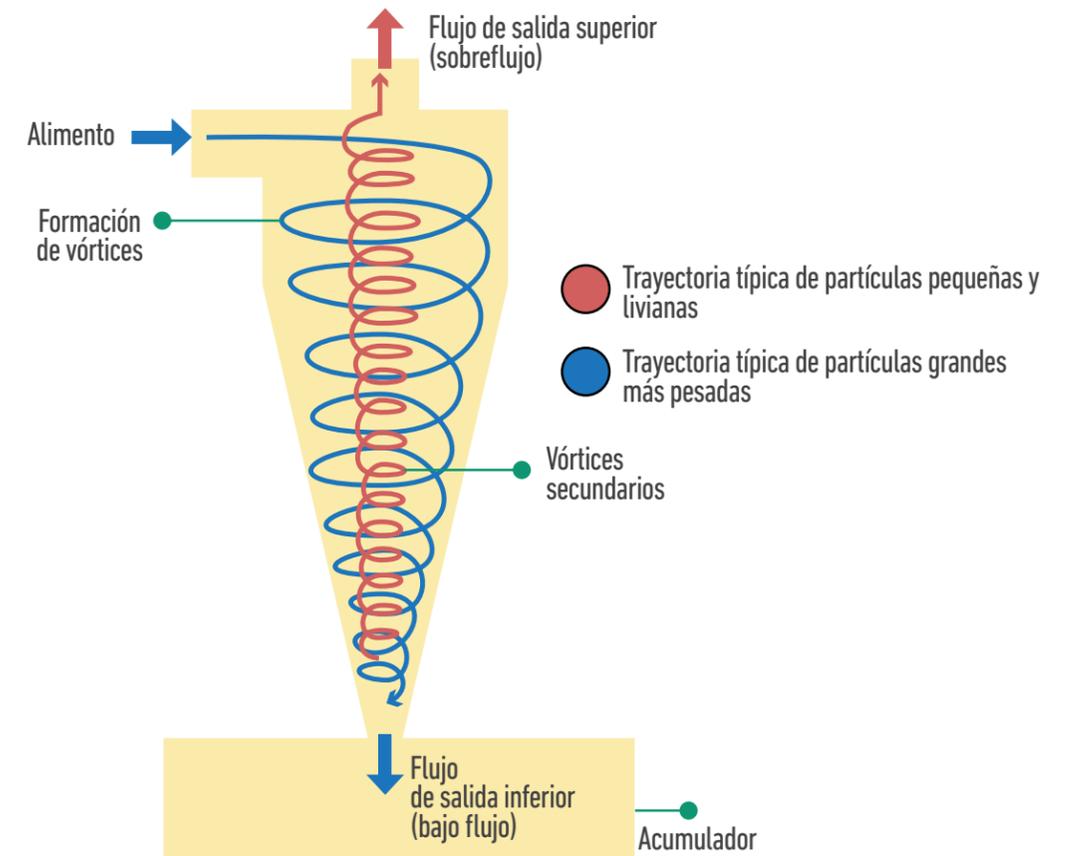
Aunque el hidrociclón es un equipo bastante simple en su forma, su funcionamiento es muy complejo.

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 |

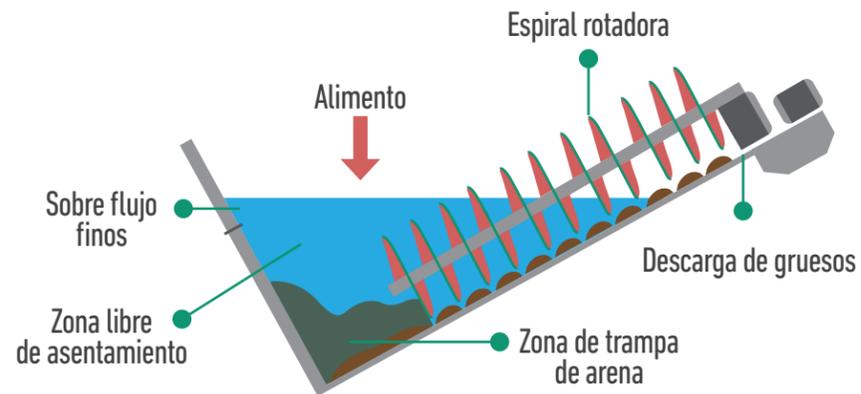


Clasificador de espiral

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

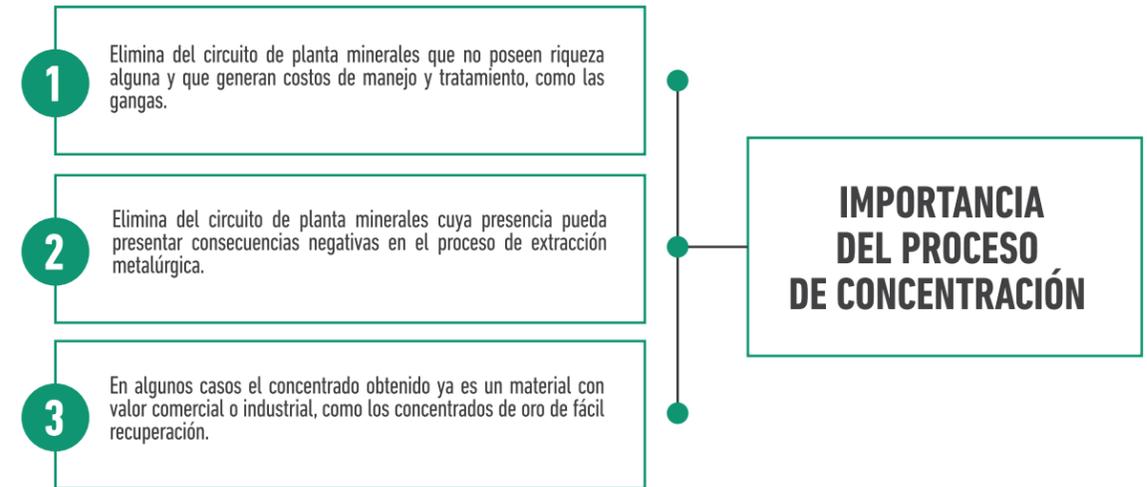
$$\text{TENOR} = \frac{\text{CANTIDAD DE MINERAL ÚTIL}}{\text{CANTIDAD DE MINERALES EXTRAÍDOS}}$$

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 (Cetem, 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) descendiente. 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 descendiente sin ser recolectadas por el canalón; posteriormente el material retenido es recolectado en tanques para su tratamiento.

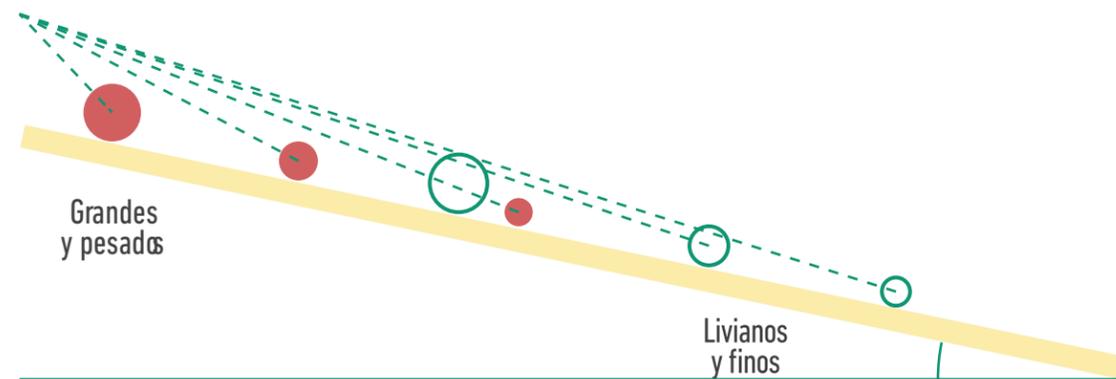
Para este tipo de minería estos canalones son generalmente construidos con concreto, aunque también se encuentran fabricados de madera, aceros convencionales o aceros inoxidable.

Las partículas en el fondo de la película de agua se ven afectadas por los siguientes factores (Cetem, 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".

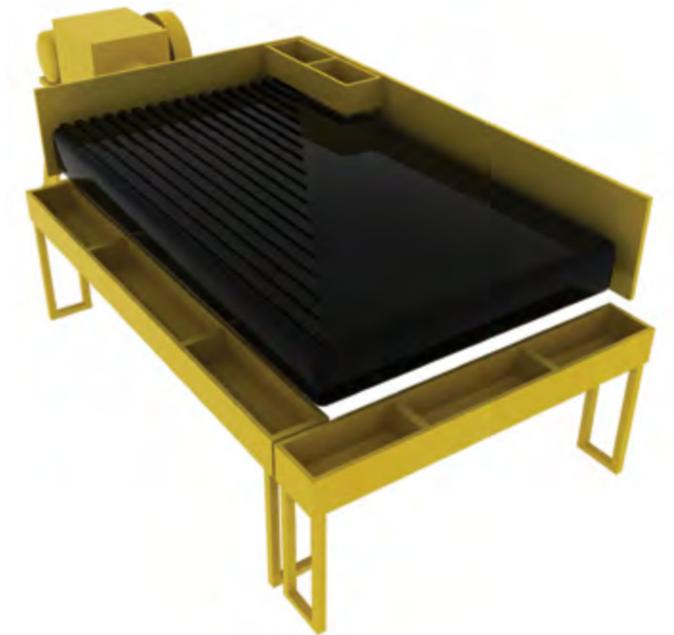
Longitud. La longitud del canalón depende de la cantidad de finos presentes en la alimentación. La mayoría de partículas gruesas se recupera en los primeros metros, mientras que los finos requieren de mayor longitud.

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

Mesas de concentración (mesa Wilfley)

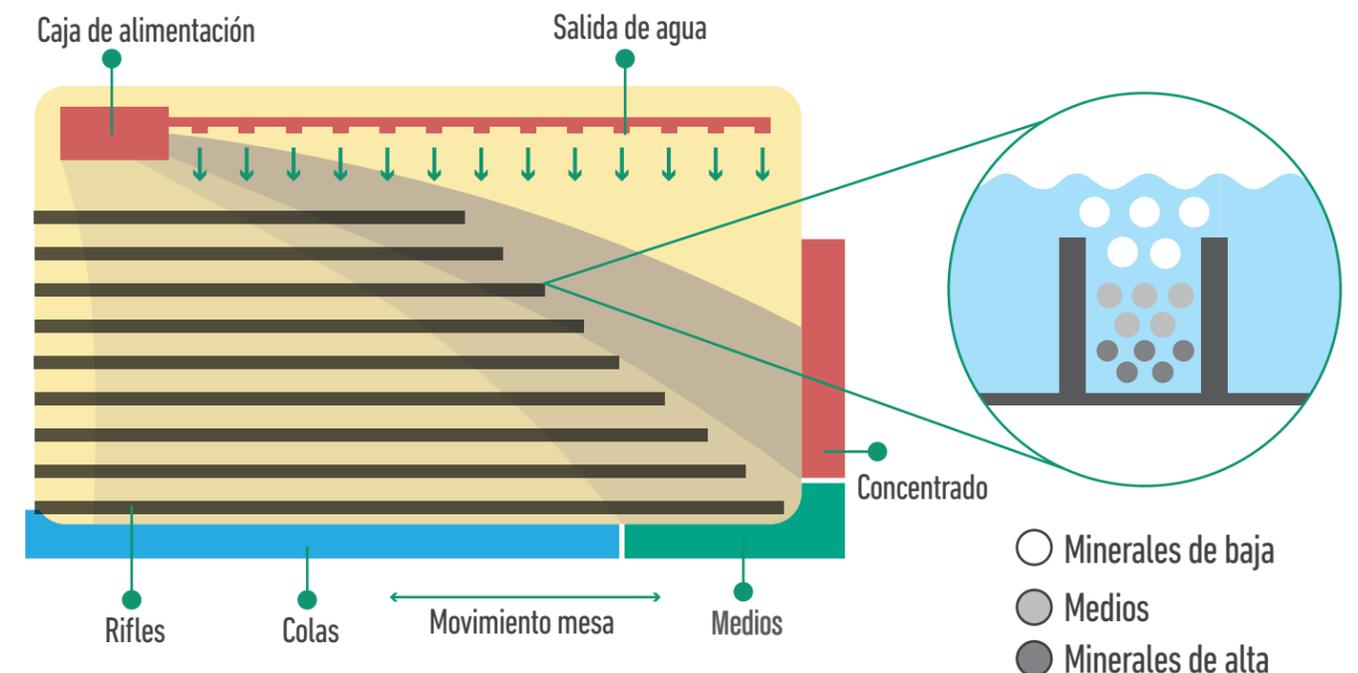
Este concentrador consiste en una mesa ligeramente inclinada con canales o rifles transversales. Se alimenta con una pulpa cuyo peso está constituido en un 25% por sólidos. La pulpa se introduce en la caja de alimentación y se distribuye por medio del agua de lavado que entra a lo largo de la superficie 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 |

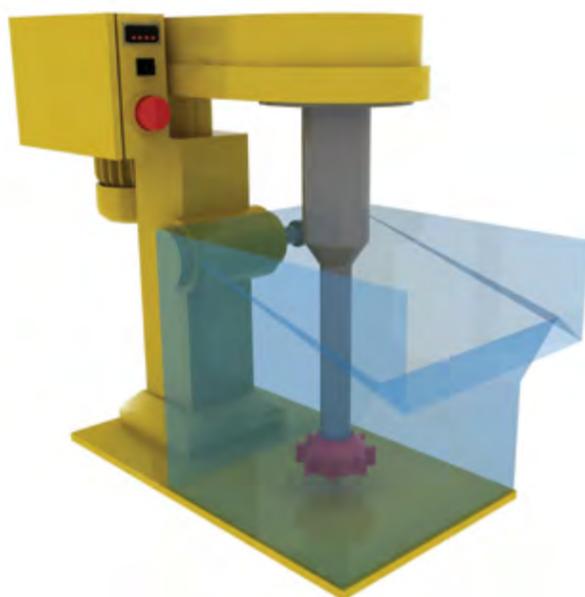
| TAMAÑO EN MICRONES | CAPACIDAD (t/h) |
|--------------------|-----------------|
| 750-250 | 1.5-3 |
| 400-150 | 1-2 |
| 200-75 | 0.5-1 |
| 100-40 | 0.2-0.5 |

| 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 |
|-------------------------------|
| · Porcentaje de sólidos |
| · Densidad del sólido |
| · Densidad del fluido |
| · Cantidad de sólido por hora |
| · Cantidad de celdas |

| VARIABLES DE OPERACIÓN |
|--------------------------------|
| · Densidad de la pulpa |
| · Caudal de pulpa por hora |
| · Volumen de trabajo en celdas |
| · Volumen de una sola celda |
| · Longitud de lado de la celda |

Fotografía 6.9. Modelo de celda de flotación para laboratorio. Fuente: autores.



6.1.6. CONCENTRACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR FLOTACIÓN

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

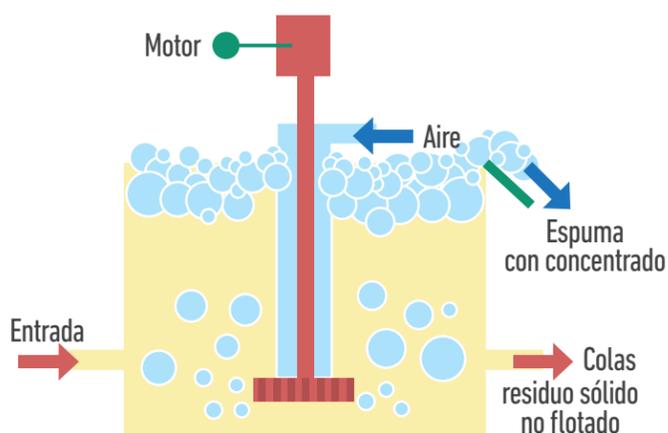
Cuando dicho sólido se deja humectar, se dice que es hidrófilo (adsorbe agua en su superficie), mientras que, si no se deja mojar, es hidrófobo. Al introducir sólidos hidrófobos en agua, sus superficies no formarán enlaces con los grupos polares; por ende, en presencia de una burbuja que asciende, el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

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



Figura 6.12. Diagrama de funcionamiento de una celda de flotación. Fuente: autores.



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, además de ser 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.

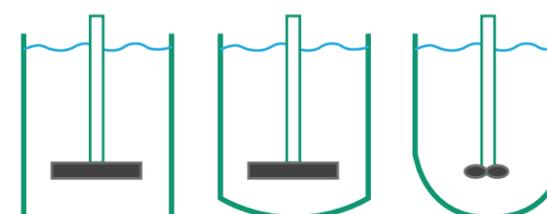
La cianuración es fuertemente afectada por el pH de la solución. Es esencial que la solución de cianuro se mantenga alcalina (altos pH) durante la lixiviación del oro, por las siguientes razones:

- Para prevenir la hidrólisis del ion cianuro
- Para prevenir la descomposición del cianuro por el CO₂ 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.



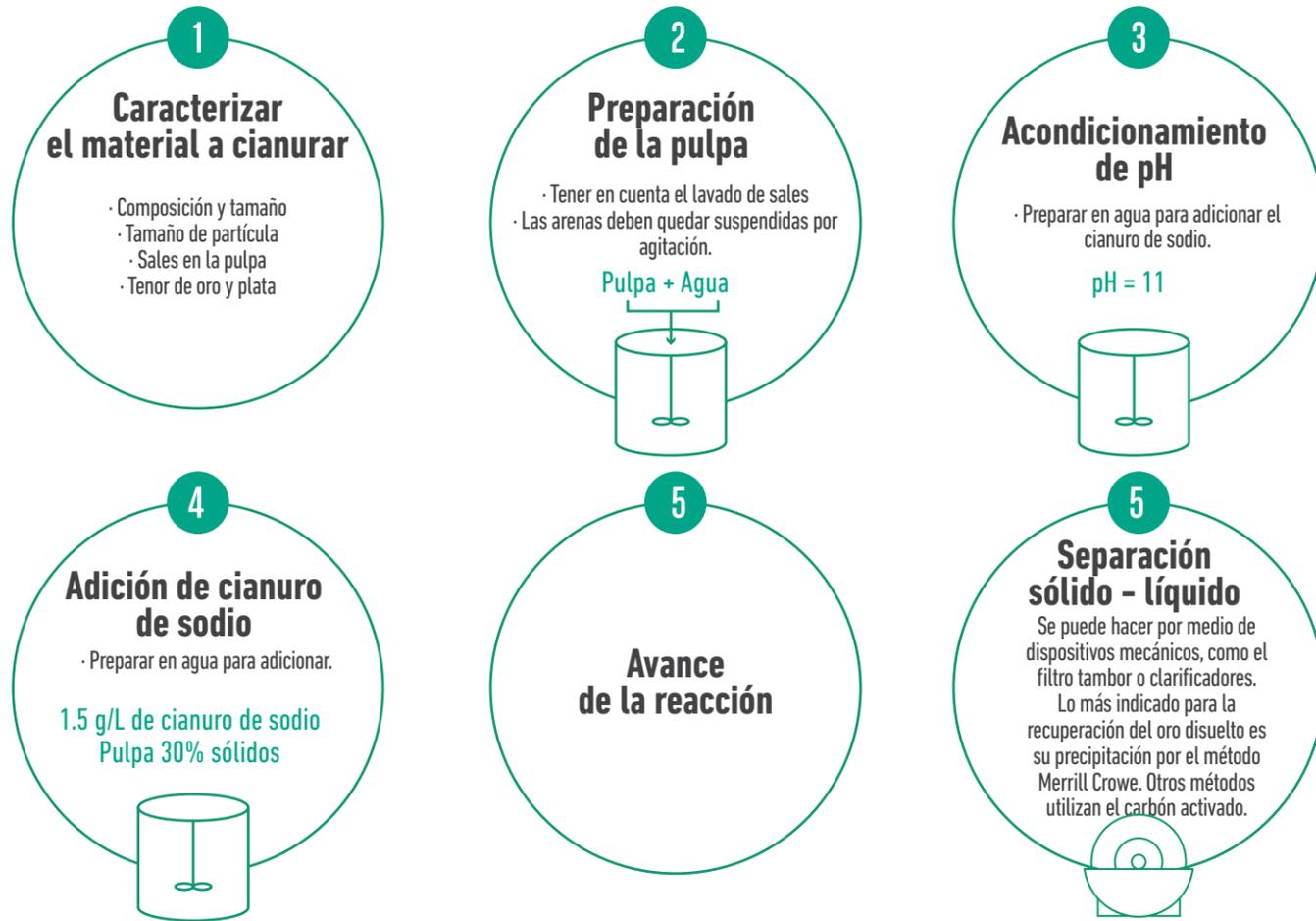
Figura 6.13. Diagrama de tipos de diseño de tanque e impulsores. Fuente: autores.



| VARIABLES DE ENTRADA |
|--|
| · Densidad del sólido (kg/m ³) |
| · Densidad del fluido (kg/m ³) |
| · Volumen de la solución (l) |
| · Velocidad del impulsor (rpm). |
| · Tipo de fondo del tanque: plano, plato, esférico |
| · 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 |

| VARIABLES DE OPERACIÓN |
|---------------------------------|
| · Volumen del tanque (l) |
| · Diámetro del tanque (m) |
| · Longitud del tanque (m) |
| · Altura de solución (m) |
| · Diámetro del agitador (m) |
| · Ancho del agitador (m) |
| · Distancia fondo agitador (m) |
| · Diámetro de los 4 baffles (m) |
| · Potencia del impulsor (HP) |

Figura 6.14. 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 efectos de recuperar una solución rica y descomponer compuestos ambientalmente dañinos.

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

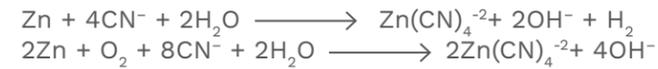


La cianuración industrial de un material aurífero produce una solución cuya concentración de oro está generalmente por encima de 2 miligramos de oro por litro (ppm), dependiendo del material lixiviado y del sistema utilizado.

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:



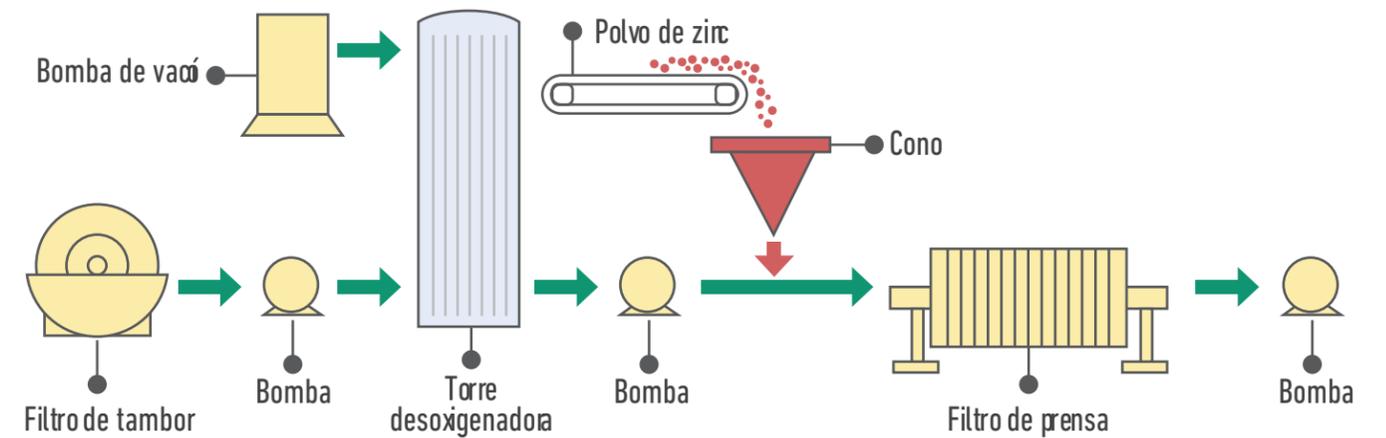
En la práctica se debe adicionar zinc entre cinco y diez veces más que los requerimientos estequiométricos. Asimismo, la presencia de oxígeno disuelto puede provocar la redisolución del oro ya precipitado, por lo que se debe garantizar una condición de vacío para evitarlo. Esto es posible utilizando 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 6.15. 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 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.

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 6.16. Diagrama de horno y crisol. Fuente: autores.

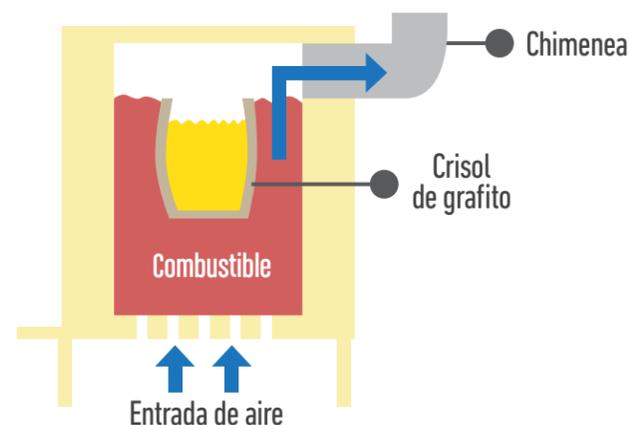
| RIESGOS | MEDIDAS DE SEGURIDAD |
|---|--|
| Inhalación de polvos de calcinas y fundentes. | Uso de mascarillas para polvo. |
| Quemaduras con herramientas calientes, moldes y salpicaduras con escoria fundida. | En general se usan delantales y guantes de asbesto, botas y caretas. |
| Astillas de escoria 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.

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



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

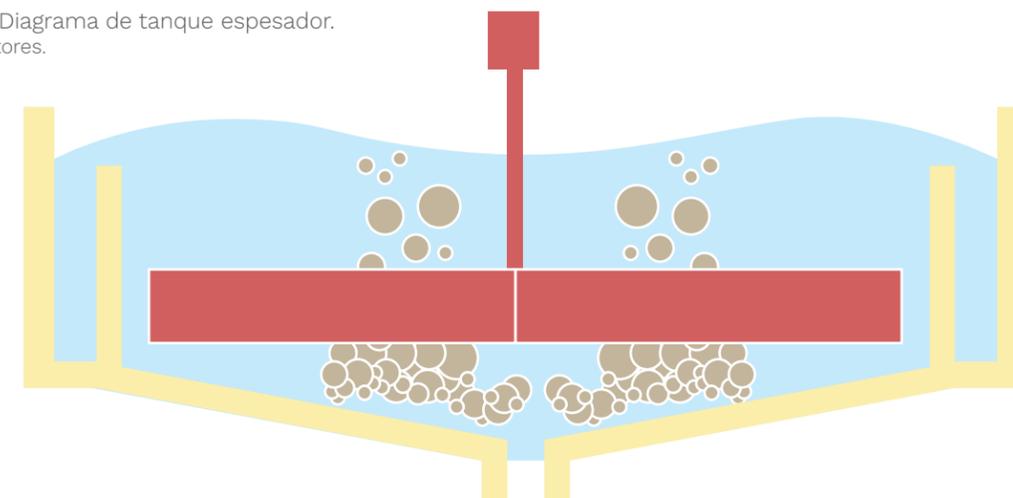
Los espesadores son usados para ampliar la concentración de sólidos de un fluido con el fin de realizar una separación sólido-líquido. El principio básico de operación de un espesador es el proceso de sedimentación, en el que las partículas suspendidas en un líquido van cayendo directamente hacia la 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 las hélices 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 6.17. 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 el principal propósito para el desarrollo del marco químico y ambiental, que busca hacer una caracterización y cuantificación de los agentes contaminantes, y determinar su movilidad e incidencia, para lo cual usa diferentes métodos químicos, instrumentales y analíticos clásicos. La evaluación se complementa con propuestas específicas para tratar y atenuar el impacto ambiental generado.

En este estudio se expone toda la información obtenida en diferentes zonas del departamento del Cauca, en los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar. El desarrollo del estudio parte de la selección de muestras líquidas y sólidas representativas tomadas en las etapas de finalización de los procesos de beneficio, como son muestras de relaves y de vertimientos generados por los mismos, además de las muestras tomadas en los puntos críticos de las fuentes hídricas, como ríos, quebradas y nacimientos de agua, entre otros, que presentan un alto riesgo de contaminación por su cercanía con la actividad minera. En las zonas visitadas en el municipio de La Sierra se encuentra como punto de interés el entable El Triunfo, la quebrada El Aguacate y el río Esmita; en el municipio de Almaguer se estudiaron, en la vereda Ruíz, el entable El Higuero y la quebrada Severino; en el municipio de Bolívar se visitaron las quebradas La Mina y el Pepinal.

Río en la vía al municipio de Bolívar (Cauca). Fotografía tomada por Verónica Ruíz, Servicio Geológico Colombiano



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

A partir de 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.

| CARACTERIZACIÓN QUÍMICA | |
|---|---|
| APLICANDO ESTAS TÉCNICAS Absorción atómica Fluorescencia de rayos X (FRX) Determinación gravimétrica de azufre Difracción Laser Potenciometría selectiva de cianuro (CN ⁻) Volumetría de ión cianuro | ES POSIBLE DETERMINAR Metales como Au, Ag, Fe, Pb, Cu, Zn y Hg Composición elemental (mayores y trazas) Contenido de azufre (sulfato y sulfuro) Tamaño y distribución de partícula Cianuro total Cianuro libre |



| CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS | |
|--|---|
| APLICANDO ESTAS TÉCNICAS Potenciometría selectiva de cianuro (CN ⁻) Absorción atómica Fluorescencia de rayos X (FRX) | ES POSIBLE Calcular la reutilización de soluciones con contenido de cianuro para nuevas cianuraciones. · Determinar la concentración de oro en un proceso de cianuración. · Deducir el tiempo de cianuración y gastos de reactivos. · Determinar la efectividad de procesos de recuperación con zinc (Zn) y ensayo al fuego. Composición elemental (mayores y trazas) |



| CONTROL AMBIENTAL | |
|--|---|
| APLICANDO ESTAS TÉCNICAS Espectrofotometría de absorción atómica TCLP TEST ABA Descomposición de cianuro libre y complejo con peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso | ES POSIBLE Metales como Ag, Pb, Cu, Cd, Fe, Cr, Ni y Hg. Determinar la toxicidad de relaves, lo que posibilita mitigar procesos de contaminación por el contacto de dichos relaves con el medio natural. Realizar procesos extractivos ambientales sostenibles. |



El reconocimiento de la importancia de los recursos ambientales es precisamente lo que permite evaluar la dimensión del impacto que genera la actividad minera en su entorno y el manejo inadecuado de este. Esto deriva en la necesidad de realizar una estructura particular de estudios químicos y ambientales que, con los aportes de la perspectiva metalúrgica y geológica, permiten identificar si los efectos producidos por agentes contaminantes pueden ser atribuidos a las actividades mineras de beneficio o a la naturaleza de la formación geológica de los depósitos.

Fotografía 7.1. Río Esmita, Almaguer (Cauca). 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 movilidad significativa en el aire. Su valor de solubilidad en agua, entre de 0,02 mg/L a 25 °C, indica que es de mediana movilidad en el agua, y su valor $\log K_{ow}$ 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.

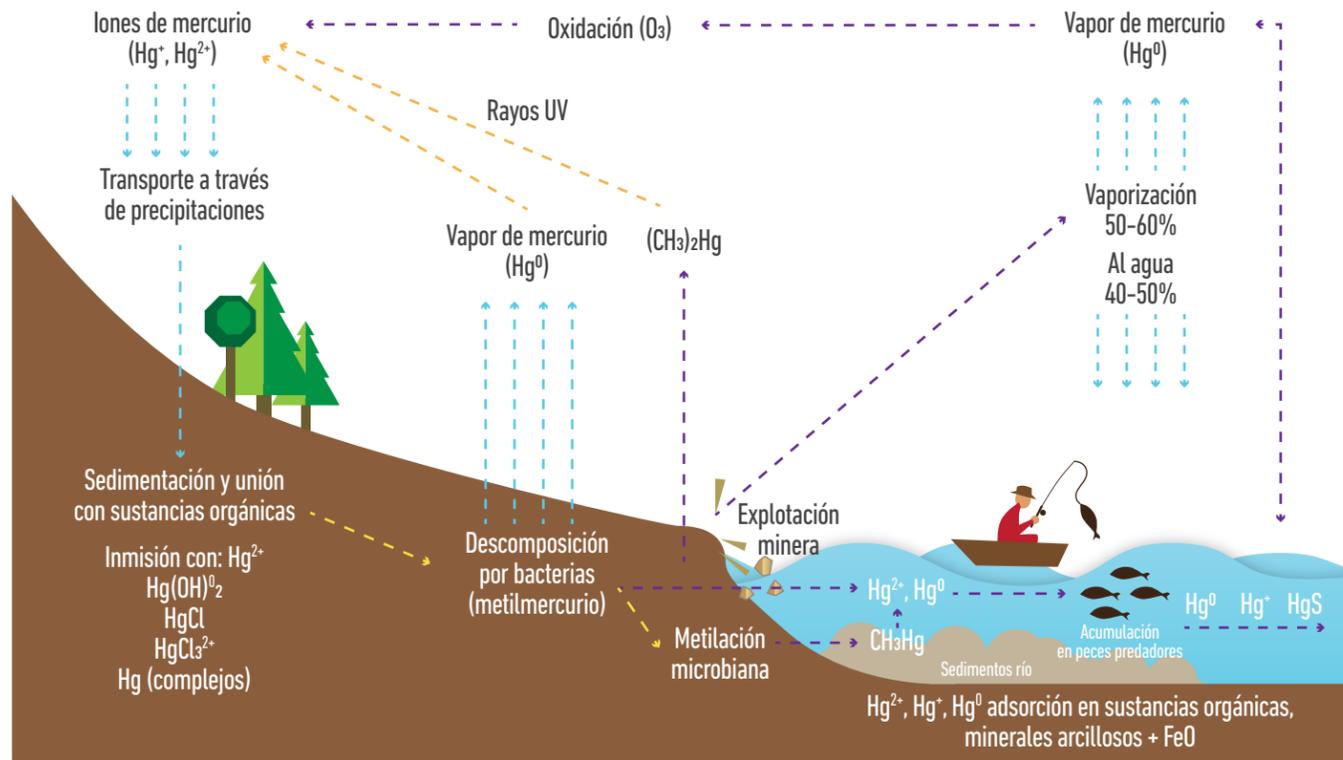
El mercurio se presenta en la naturaleza en diferentes especies químicas: las de tipo elemental (Hg_0), las de tipo inorgánico (Hg^+ , Hg^{2+}) y las orgánicas. El metilmercurio ($HgCH_3$) y el dimetilmercurio ($Hg(CH_3)_2$) son las formas orgánicas más tóxicas que afectan el sistema inmunológico, alteran 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 de intoxicación con mercurio en el organismo humano son los daños al sistema nervioso, daños cerebrales, daño al ADN y a los cromosomas, reacciones alérgicas, cansancio, dolor de cabeza y 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, la disposición de colas de procesos de amalgamación puede contaminar las aguas subterráneas y las fuentes superficiales. 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: el cianuro forma con el mercurio complejos estables, solubles y difíciles de remover ($Hg(CN)_2$ y $Hg(CN)_4$). La lixiviación de complejos de cianuro-mercurio (usualmente en forma 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.

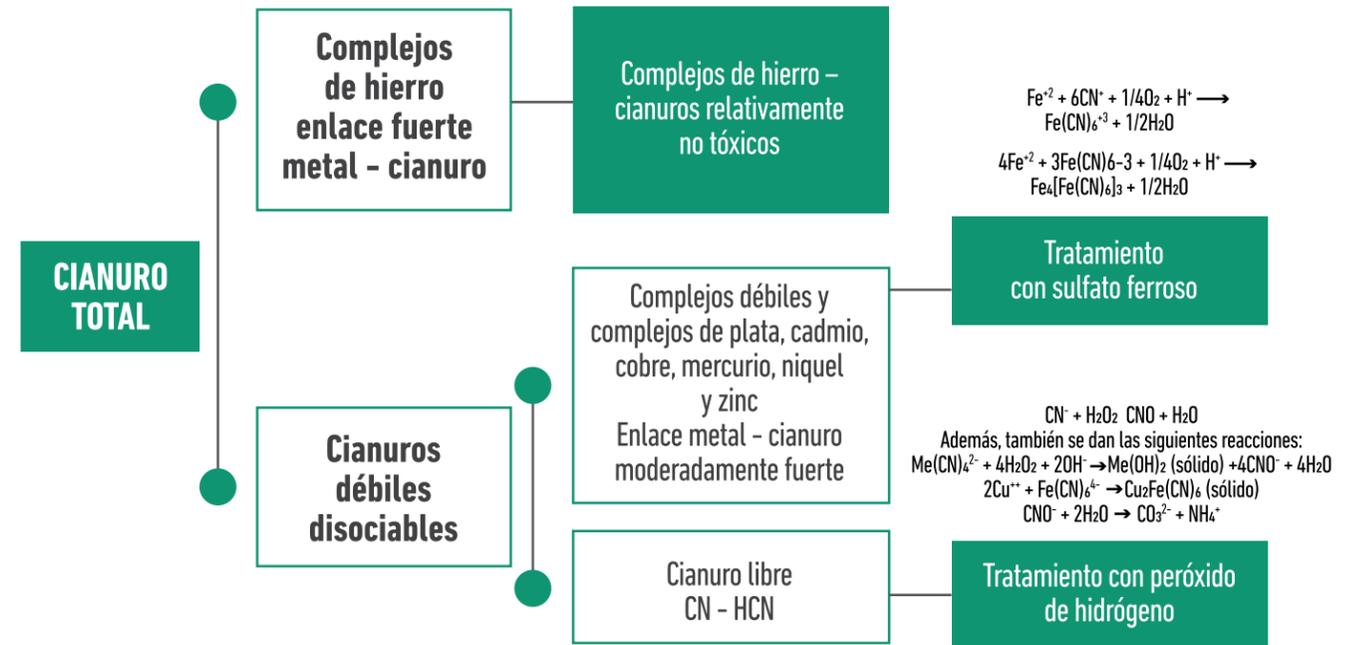


La Ley 1658 de 2013 desarrolla el marco legal "por medio del cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones". Los ministerios de Minas y Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Salud y Protección Social, Trabajo, Agricultura y Desarrollo Rural, Transporte y Comercio, 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 para 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 que requieren la utilización.

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.

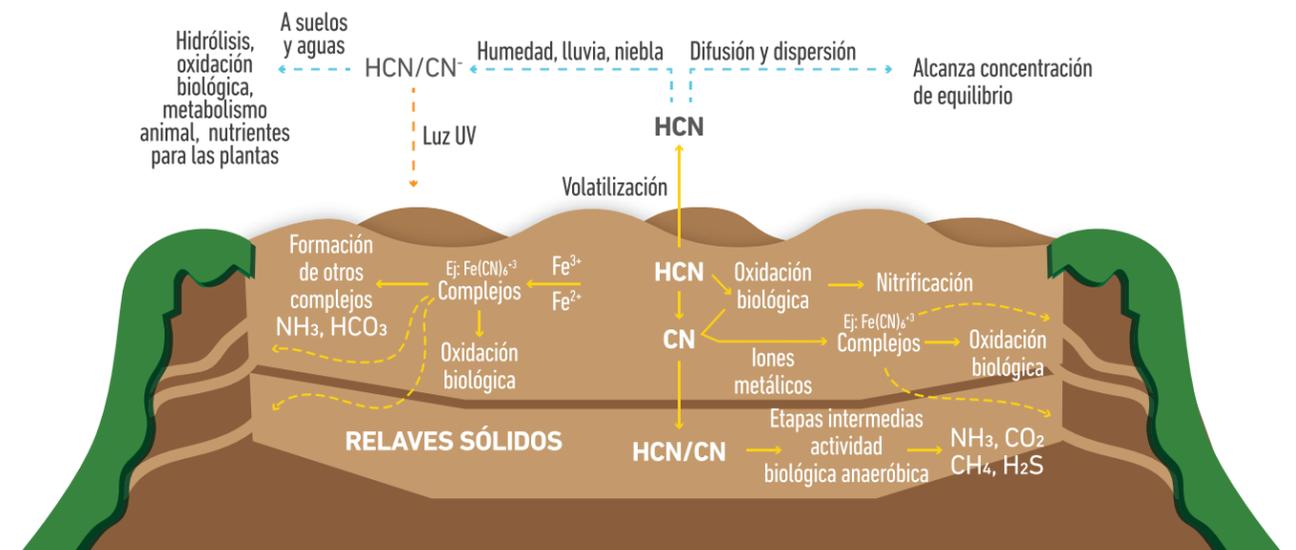


Los compuestos de cianuro presentes en la minería del oro y en las soluciones y efluentes de cianuración comprenden el cianuro libre, sales de cianuro de metales alcalinos y alcalino-térreos, y complejos de cianuros metálicos formados con oro, mercurio, cadmio, zinc, plata, cobre, níquel, hierro y cobalto,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

Dinámica del cianuro en un relave de residuo minero

Debido a las muchas reacciones y transformaciones que experimenta naturalmente, 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.

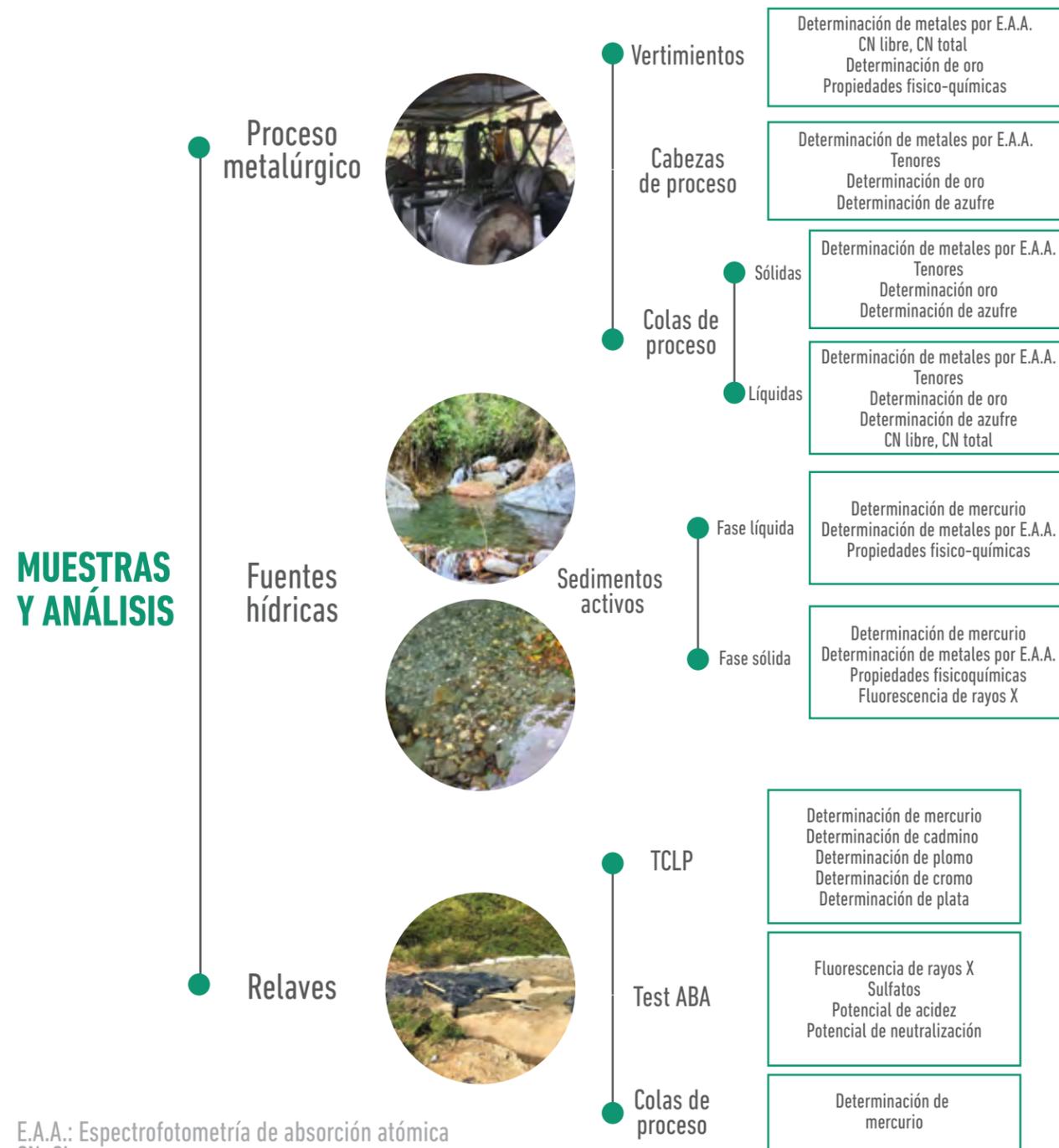
Figura 7.4. Reacciones bioquímicas del cianuro en un material residual de la cianuración. Fuente: Modificado Cáceres, 2001.



7.2.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y AMBIENTAL

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. Para ello se hace una comparación de las muestras tomadas antes y después de dichos procesos. Los tipos de muestras recolectadas son relaves, sedimentos, rocas y vertimientos, a las 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

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



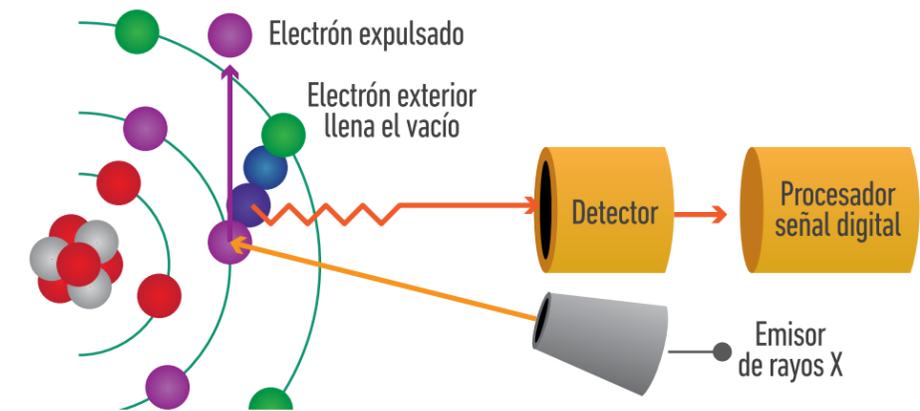
para determinar la composición elemental de los minerales formadores de roca encajante y los minerales de mena que componen las unidades geológicas presentes en la zona estudiada y con el marco metalúrgico genera información técnica que permite el seguimiento analítico de las diferentes pruebas realizadas, en el control de unidades metalúrgicas para desarrollar procesos de beneficio más eficientes.

Como información 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 a las plantas y fuentes hídricas visitadas.

7.2.3.1. APLICACIÓN DE LA ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Es una técnica no destructiva que emplea una cantidad pequeña de muestra sólida (suelos, sedimentos activos, rocas, arenas, metales, entre otros), lo que permite determinar el contenido de varios elementos en una misma lectura, genera 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, específicamente debida a la respuesta de un material que luego de ser irradiado y excitado por rayos X se reordena emitiendo una radiación llamada fluorescencia de rayos X, que aporta información del contenido de elementos en cada una de las muestras analizadas (Skoog, Holler, Nieman, 2001: 291-317).

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



Las muestras sólidas pueden ser rocas, sedimentos activos, relaves, cabezas de proceso, productos intermedios y material de rechazo, de tal modo que en el momento del análisis dichas muestras deben estar pulverizadas (por debajo de los 75 micrones) para adicionar de 2 a 5 gramos y depositarlas en un portamuestras. Posteriormente se realiza el análisis haciendo uso del equipo de fluorescencia de rayos X. Existen dos formas de realizar el análisis: en modo minería, en caso de que se desee determinar elementos que se encuentren mayoritariamente, por lo general por encima del 1% másico, y en modo suelos, 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 realizar el tratamiento previo de las muestras; se debe 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 este análisis se realiza en ausencia de llama, debido a la fácil volatilidad del elemento cuantificado. Esta metodología se denomina absorción atómica-generación de hidruros.

Generalmente, las muestras provienen de diversos orígenes; 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:

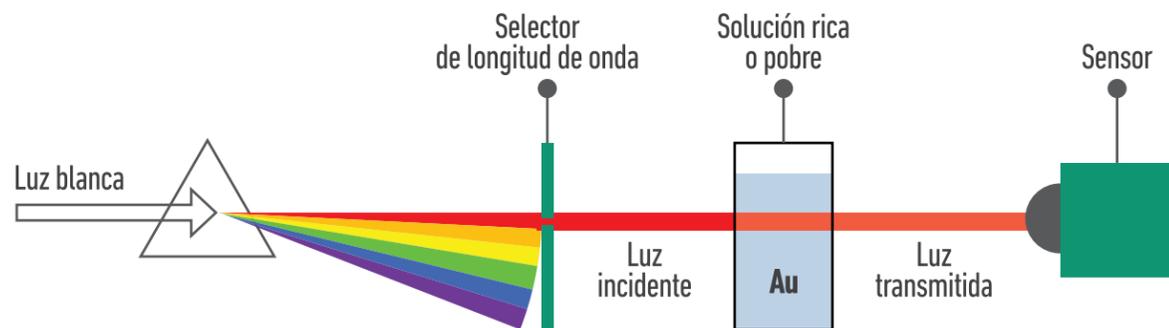


Esta técnica se emplea en la determinación de oro en muestras líquidas cianuradas de procesos metalúrgicos, específicamente de procesos de cianuración en los que se obtienen soluciones ricas en dicho metal, cuando es necesario conocer sus concentraciones para efectos de controlar el proceso, como son 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, con la liberación del exceso de energía en forma de calor. La longitud de onda (λ) 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 cuando no se cuenta 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 para eliminar interferencias. Esta precipitación se realiza con soluciones cianuradas que contengan una concentración de cianuro mayor que o igual a 1 g/L, y cuyos valores de pH sean mayores de once 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, para 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 M), 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 que abarca desde 5 ppb a 260 ppm. Puede ser aplicado en análisis de 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 cianurómetro utilizado en el laboratorio del SGC sede Cali. Fuente: autores.

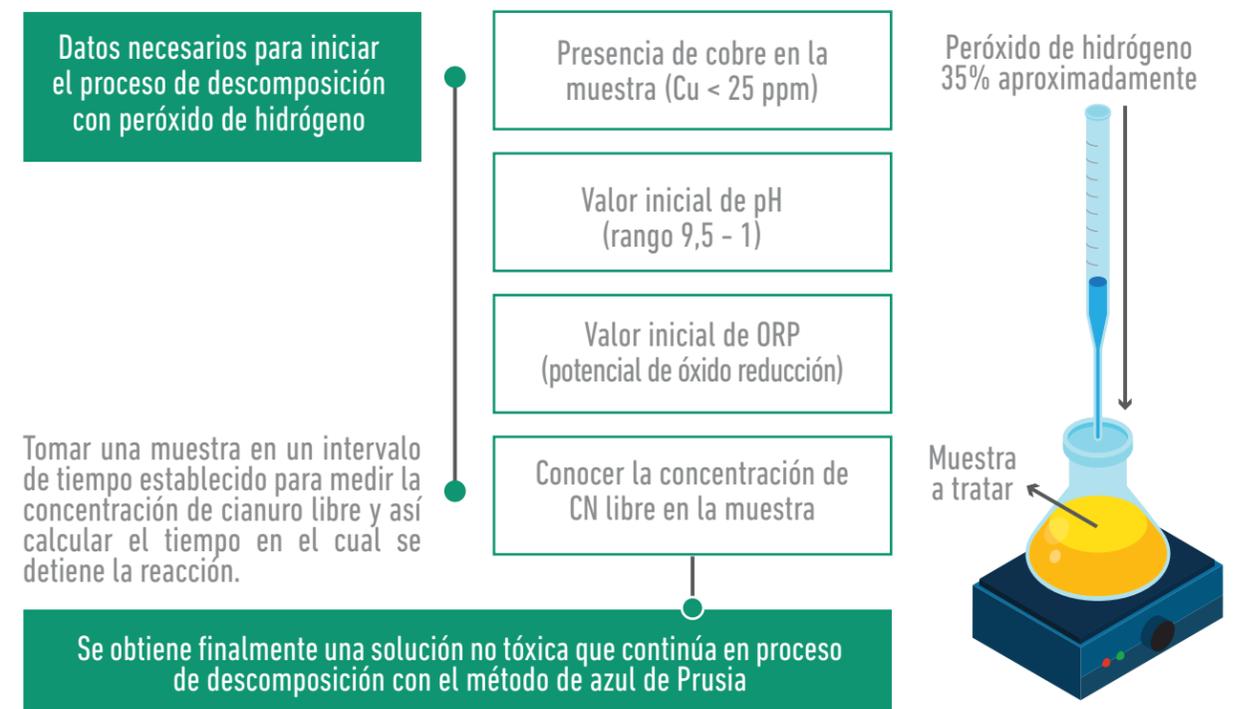


7.2.3.5. TRATAMIENTOS DE DESCOMPOSICIÓN DE CIANURO

De acuerdo con lo expuesto, existen dos formas principales de cianuro: libre y compleja. 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 evidencia los parámetros físico-químicos que se deben tener en cuenta en el proceso y los equipos que se requieren.

Método para descomponer el cianuro complejo presente en la solución residual

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⁻:

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

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

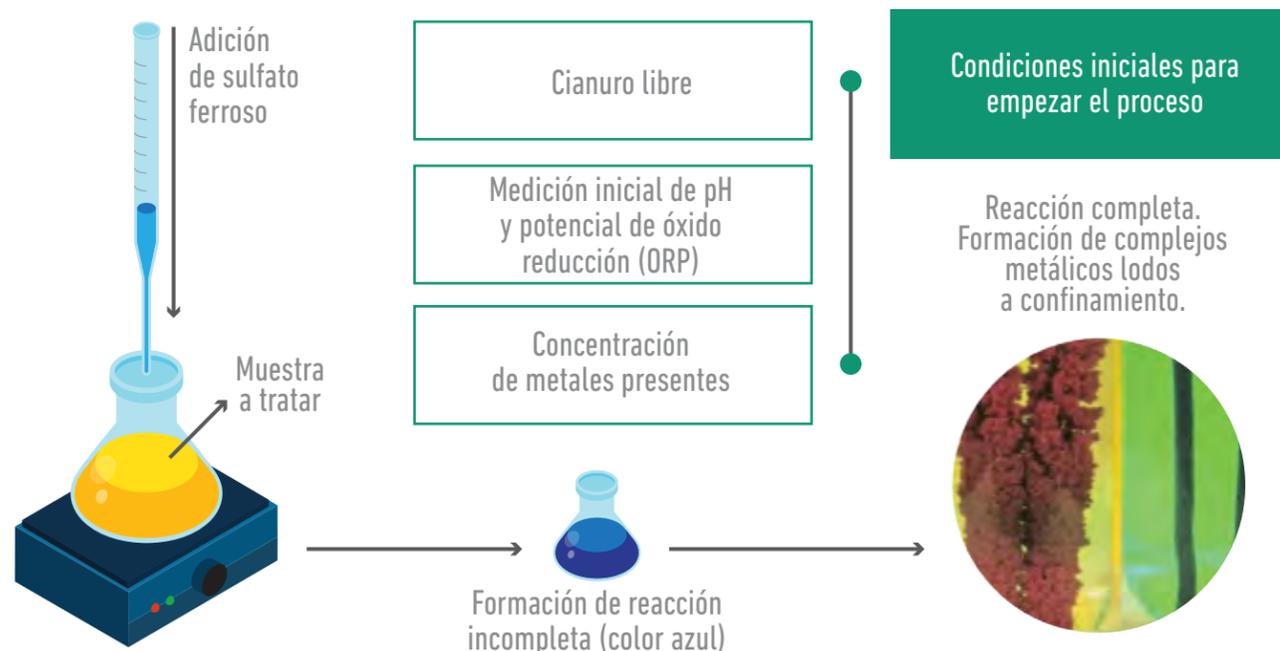
Fórmula para el consumo de peróxido, relación 5 a 8 veces:

$X \text{ g CN}^-/\text{L} \cdot \text{volumen de muestra que se van a tratar} \cdot 5 = \text{g de H}_2\text{O}_2$

$(\text{g de H}_2\text{O}_2/0,35)/1\text{ml}/1,19\text{g H}_2\text{O}_2 = \text{volumen en ml que se va a gastar de H}_2\text{O}_2$

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 (FeSO₄·7H₂O).

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⁻:

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

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

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

$X \text{ moles CN}^-/\text{L} \cdot \text{volumen de muestra que se va a tratar} \cdot 0,5 \text{ o } 5 = \text{moles de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

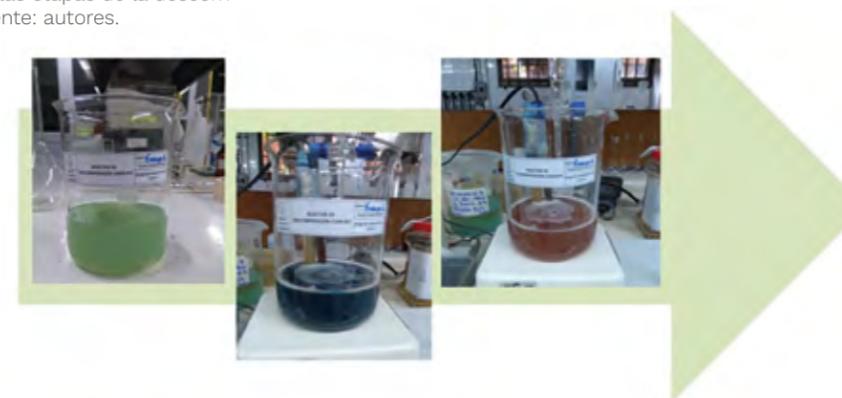
$(\text{Moles de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \cdot 278,05\text{g FeSO}_4/1\text{mol FeSO}_4 \cdot \text{concentración de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) = \text{volumen que se va a necesitar de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O al } 33\%$

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 con el transcurso del tiempo y llegar al valor mínimo o no detectable. Se observaron los colores típicos de estas reacciones (azul, verde y marrón), comunes en la precipitación de cianuro. El exceso de hierro a pH ácido promueve la formación de las siguientes sales complejas y muy estables en las siguientes reacciones químicas:



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



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

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 producto de 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 el Thiobacillus ferrooxidans.

El procedimiento de lixiviación característica de toxicidad es una herramienta de caracterización mediante la cual se estudia la capacidad de lixiviación de analitos tóxicos, para definir los impactos en el ambiente referidos a contaminación de aguas superficiales, de suelos y riesgos a la salud.

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 |

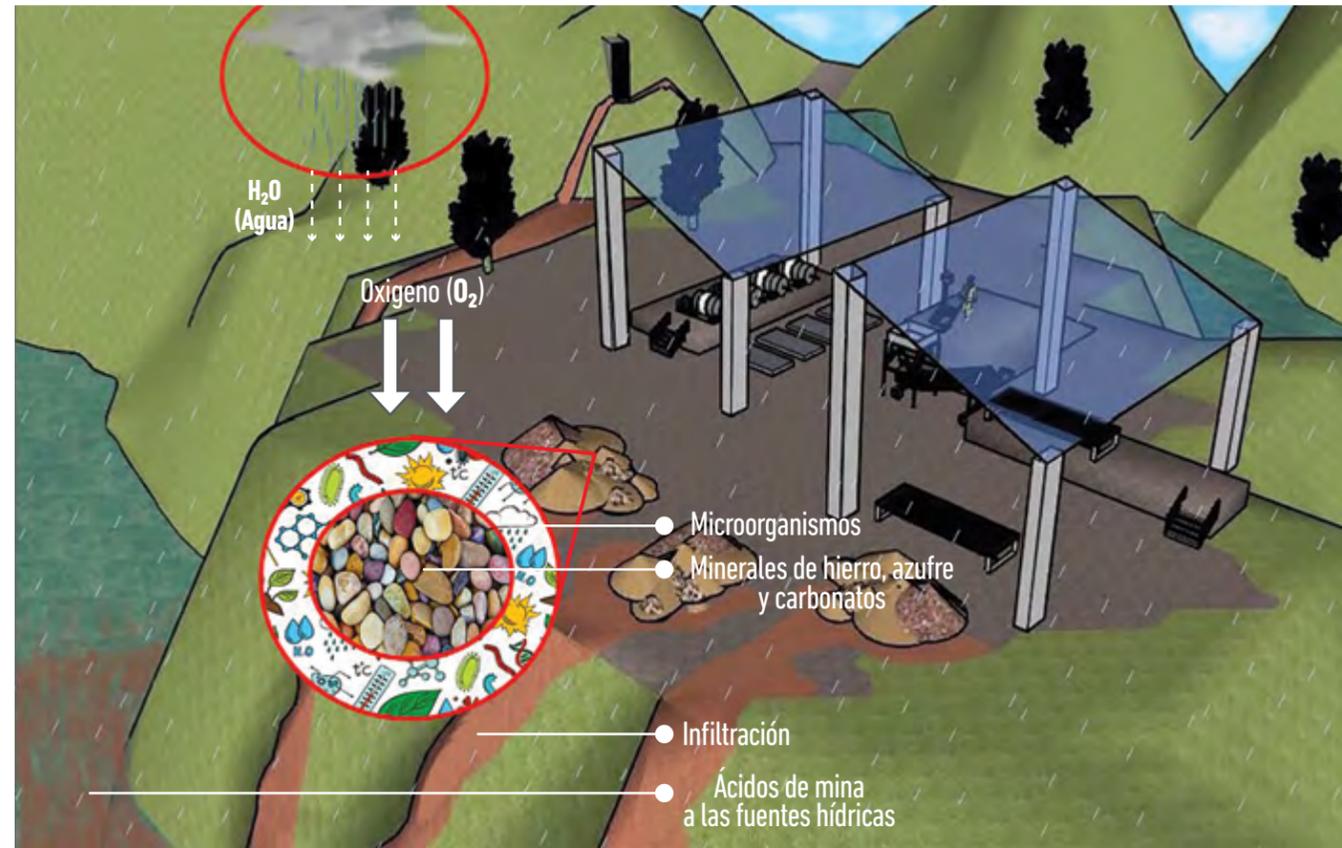
*Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP-Decreto 4741 de 2005.

La exposición de minerales sulfurados al ambiente ocurre cuando se hace apertura de túneles, remoción de material estéril de una mina y disposición de residuos producto 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, al interactuar el agua del ambiente con los óxidos formados, genera agua ácida, que contiene iones de metales pesados, que, al ser arrastrados a fuentes de agua superficial o subterránea, terminan contaminándola. En la figura 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 a través de las labores de acceso y la porosidad creada en las pilas de estériles y residuos; a ello se une el cambio de composición química y el incremento de la superficie de contacto de las partículas (Aduvire, 2006).

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 agua y pueden llegar a causar daños a las estructuras construidas por el hombre (Aduvire, 2006). Generalmente, la producción de ácido de un material se mide en función de la presencia de azufre en el mineral.

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



7.3. PUNTOS DE MUESTREO VISITADOS Y MUESTRAS PUNTUALES ANALIZADAS

7.3.1. MUNICIPIO LA SIERRA, ENTABLE EL TRIUNFO, QUEBRADA EL AGUACATE Y RÍO ESMITA

En la zona visitada del municipio La Sierra se tomaron dos puntos de referencia para el estudio ambiental. El primer punto fue el entable El Triunfo, donde se inició la recolección de muestras con una toma de relave (fotografía 7.4) y su respectivo vertimiento, que llegaba a las aguas de la quebrada El Aguacate, donde, por esta influencia, se realizó el muestreo aguas abajo de la actividad minera del entable El Triunfo, y de la mina La Linda. Para respaldar el muestreo se tomó agua de la quebrada que abastece el entable El Triunfo. Como segundo punto de referencia se tomó el río Esmita, que es el cuerpo hídrico dominante de la zona, el cual se muestreó aguas arriba y aguas abajo de las actividades de beneficio.

Fotografía 7.2. A) Cancha de relaves del entable El Triunfo. B) Vertimiento de relaves en el entable El Triunfo. C) Quebrada de abastecimiento para el entable El Triunfo. D) Quebrada El Aguacate, aguas debajo de la actividad minera. F) Río Esmita, aguas arriba de la actividad minera. G) Río Esmita, aguas debajo de la actividad minera. Fuente: autores.



7.3.2. MUNICIPIO ALMAGUER, ENTABLE EL HIGUERÓN, QUEBRADA SEVERINO

Se realizó el muestreo en la vereda Ruíz, tomando como zona de estudio los alrededores de la actividad mineral del entable El Higuierón. Se eligieron como puntos de interés ambiental los relaves generados por las actividades de beneficio de El Higuierón (fotografía 7.5) y los sedimentos activos de la quebrada Severino, contigua a los pozos de relave de El Higuierón (fotografía 7.6). Como información de respaldo, se hizo un muestreo superficial de aguas de un afluente de agua natural cercano a la quebrada Severino (fotografía 7.7) y al punto de agua de nacimiento La Portada, que abastece el acueducto de toda la zona en Almaguer, para evaluar sus aportes en la caracterización química y ambiental.

Fotografía 7.3. A) Patio de relaves de la actividad de beneficio del entable El Higuierón. B) Quebrada Severino, aguas abajo de la actividad minera del entable El Higuierón. C) QAgua natural cercana al afluente de la quebrada Sevelin. Fuente: autores.



7.3.3. MUNICIPIO BOLÍVAR

Para los estudios ambientales de la zona se visitó la vereda El Pepinal, donde se ubicó como punto de análisis para la toma de sedimentos activos líquidos y sólidos la quebrada La Mina (fotografía 7.8), por ser esta una zona intermedia de la actividad. Con el propósito de generar una evaluación más amplia sobre el aporte de agentes contaminantes generado por el beneficio de oro, se tomó una muestra de sedimentos activos líquidos y sólidos en la quebrada El Pepino (fotografía 7.9), aguas abajo de la actividad minera del sector.

Fotografía 7.4. Quebrada La Mina, aguas intermedias de la actividad minera, vereda EL Pepinal. Fuente: autores.



Fotografía 7.5. Quebrada El Pepino, aguas debajo de la actividad minera. Fuente: autores.

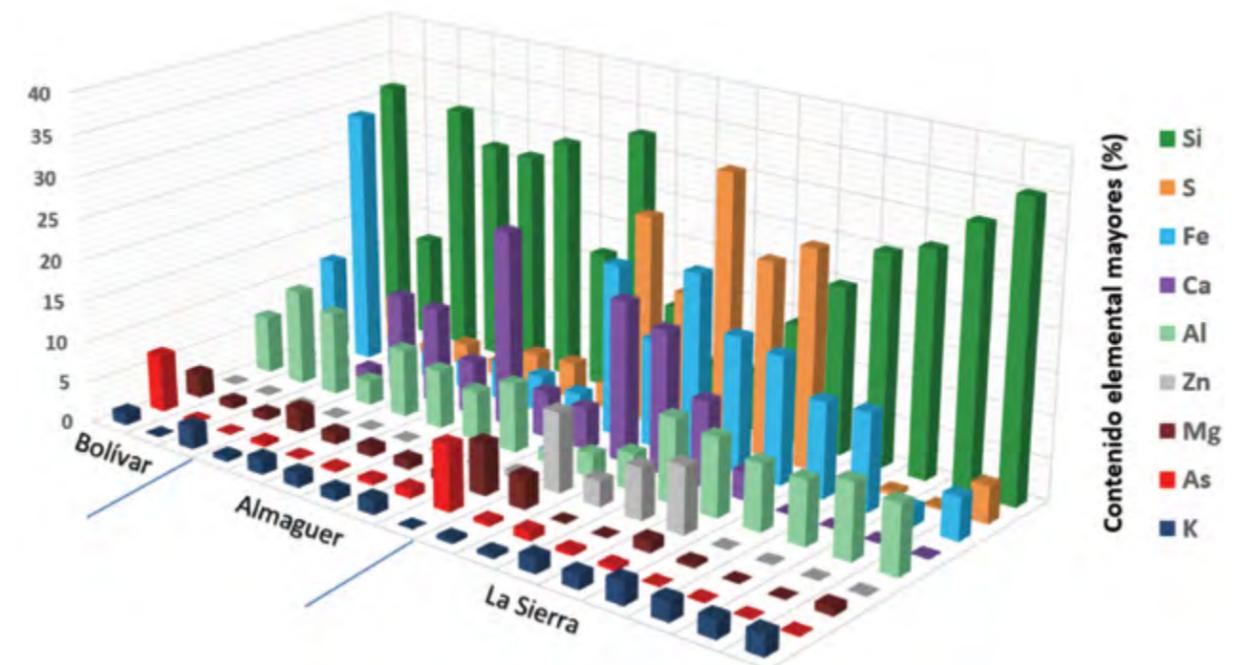


7.4. ANÁLISIS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

7.4.1. ANÁLISIS ELEMENTAL MEDIANTE LA TÉCNICA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN MATERIAL DE CABEZA

Se analizaron las muestras de cabeza de proceso metalúrgico. Se determinaron elementos mayores y menores en cada una de las muestras recolectadas. Los resultados se encuentran en la figura 7.14.

Figura 7.14. Composición elemental mayoritaria del material de cabeza en los municipios de Almaguer, La Sierra y Bolívar, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



Estos resultados permitieron determinar que el material de cabeza contiene silicio en mayor proporción, debido a que este tipo de material provenía principalmente de vetas de cuarzo.

El contenido indicó que en La Sierra y Almaguer el elemento predominante es el azufre, que se encontró entre 0,25 y 32,7%, y entre 1,5 y 25,5%, respectivamente. Este elemento se encuentra asociado al hierro, y se apreció un comportamiento gráfico similar entre estos dos elementos, aunque cabe resaltar que en Almaguer y La Sierra el hierro se encontró en menor proporción que el azufre, y su contenido fue de 3,2 a 20,77% en Almaguer, y entre 2,21 y 22,33% en La Sierra, lo que puede indicar una mayor presencia de sulfuros de hierro, mientras que en el municipio de Bolívar, el hierro estaba en mayor proporción que el azufre, y su contenido fue de 3,73 a 31,24%, lo que puede ser una evidencia de la oxidación del hierro y, por ende, de una mayor presencia de FeOx.

El arsénico se encontró presente en los tres municipios. En La Sierra presenta menores concentraciones, posiblemente debido a la baja cantidad de arsenopirita (FeAsS) presente.

También se pudo determinar que en La Sierra hay una cantidad significativa de zinc (9,60%), lo que se atribuye a la presencia de esfalerita (ZnS) en la zona.

El contenido de calcio oscila entre el 0,7 y el 19,25%, aunque este elemento también predomina en Almaguer (entre el 5,08 y el 23,80%), por lo que se puede prever la presencia de carbonatos de calcio (CaCO3) como calcita; además, este elemento es evidencia de que hubo un proceso fuerte de mineralización, aunque también pudo ser aportado por la roca hospedante, rica en carbonatos.

Según lo que se observa en el gráfico correspondiente al contenido de magnesio, se podría atribuir la presencia de este elemento al aporte de minerales ferromagnesianos en las rocas hospedantes, cuya alteración genera arcillas cloríticas ricas en magnesio. Por último, viendo en los respectivos gráficos el comportamiento tan similar del aluminio y el potasio, se puede inferir la posible presencia de minerales de arcilla, como micas, que son ricas en potasio, y caolinitas, que son ricas en aluminio, y que estos elementos pudieron derivar de la alteración de los feldespatos, sobre todo en La Sierra y Almaguer.

La figura 7.15 muestra los resultados de análisis de elementos menores, o trazas, en partes por millón (ppm), contenidos en el material de cabeza. Del resultado de este análisis se pudo deducir que en general el plomo (Pb) y el titanio (Ti) eran elementos traza representativos, seguidos del manganeso, bario y cobre. Los menos representativos se presentaron por debajo de los 1000 ppm, y fueron cobalto, cadmio, antimonio, wolframio, estroncio, mercurio, estaño, rubidio, zirconio, plata y selenio.

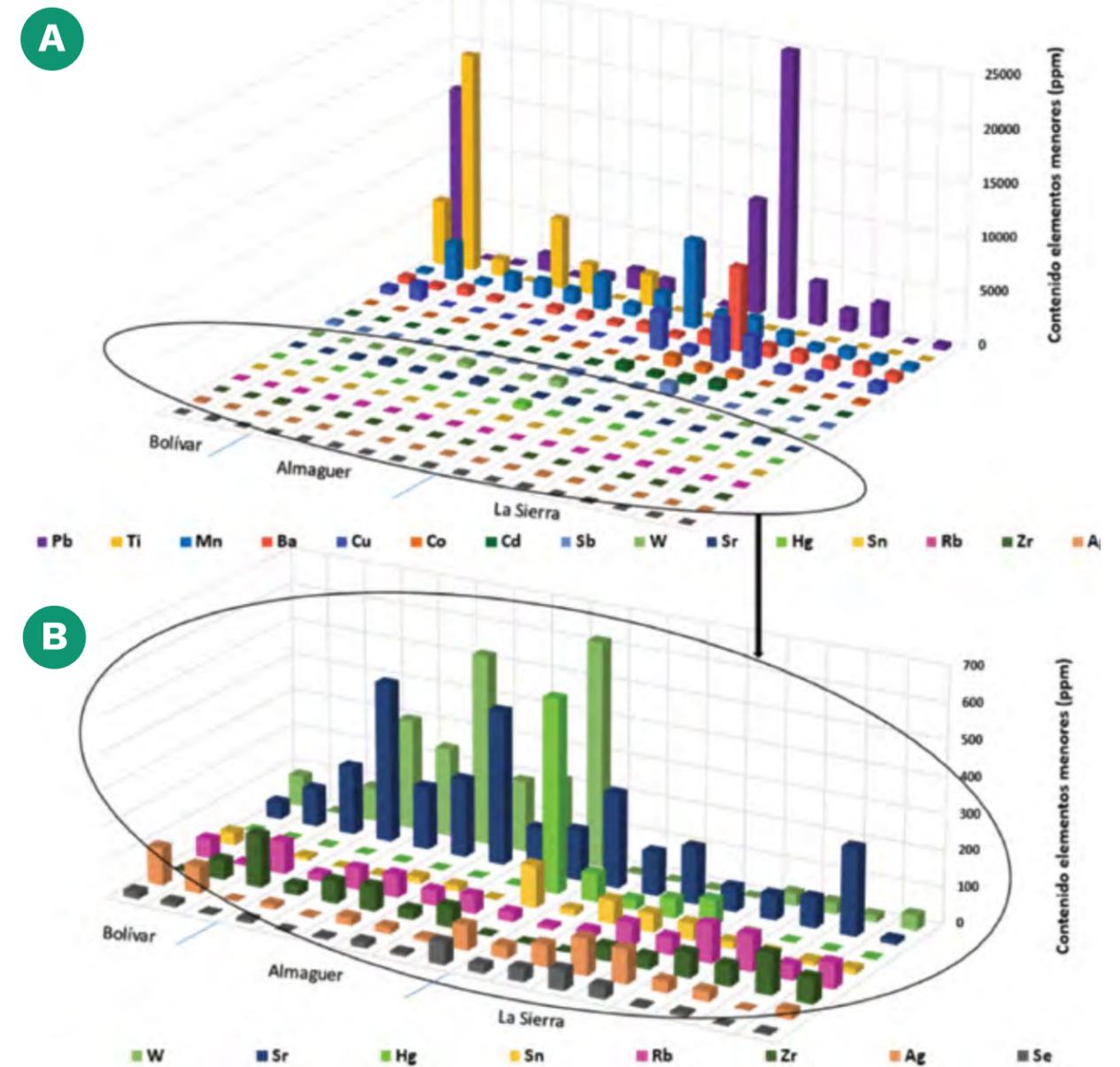
El contenido de plomo, cobre y zinc encontrado se relaciona con la presencia de sulfuros. De la interacción de estos tres elementos traza surgen la galena, calcopirita y esfalerita, respectivamente.

El contenido de titanio normalmente se le atribuye a la roca hospedante proveniente de magmas alcalinos ricos en titanio. El cadmio está principalmente asociado con la esfalerita; es evidente su presencia en la zona de La Sierra, con contenido de Zn. El antimonio que se observa como elemento traza, con un contenido significativo en una zona de la Sierra, se puede atribuir a la presencia de tetraedrita ((CuFe)₁₂Sb₄S₁₃), mientras que entre los elementos que se encuentran por debajo de las 650 ppm están el tungsteno, el estroncio, el rubidio y el zirconio, que normalmente hace parte del contenido de la roca hospedante.

7.4.2. 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 de una magnitud que depende del caso específico. Se recolectaron muestras de relaves expuestos en las plantas de beneficio de la zona de La Sierra, en las plantas El Triunfo,

Figura 7.15. Contenido (en partes por millón o gramos por tonelada) de elementos traza (A) en mayor cantidad y (B) en menor cantidad, en el material de cabeza de los municipios de Almaguer, La Sierra y Bolívar, determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



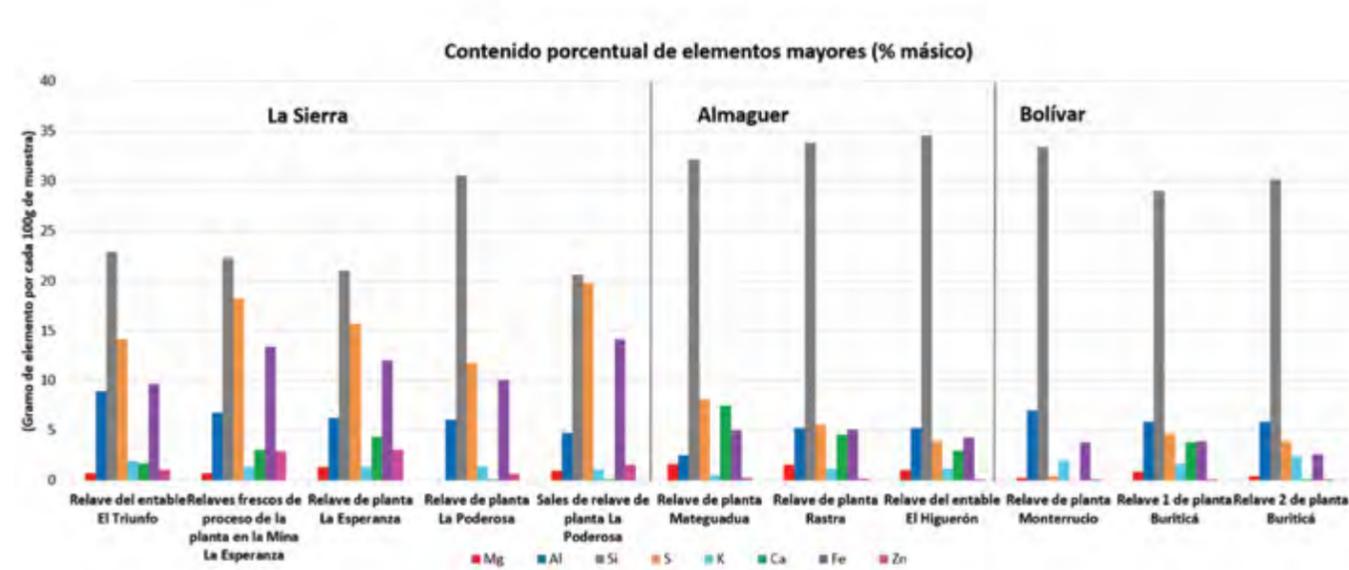
La Esperanza y La Poderosa. En Almaguer, en Mata Guadua, Rastra y El Higuerón. Finalmente, en la zona de Bolívar se recolectaron relaves de Monterrucio y Buritica.

Se realizaron análisis del contenido de elementos mayores y menores mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, con el objetivo de caracterizar y conocer principalmente las cantidades de materiales que podrían causar problemas de contaminación, 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 a que fueron sometidas las muestras de cabeza de proceso de los municipios de Almaguer, La Sierra y Bolívar se presentan en la figura 7.16.

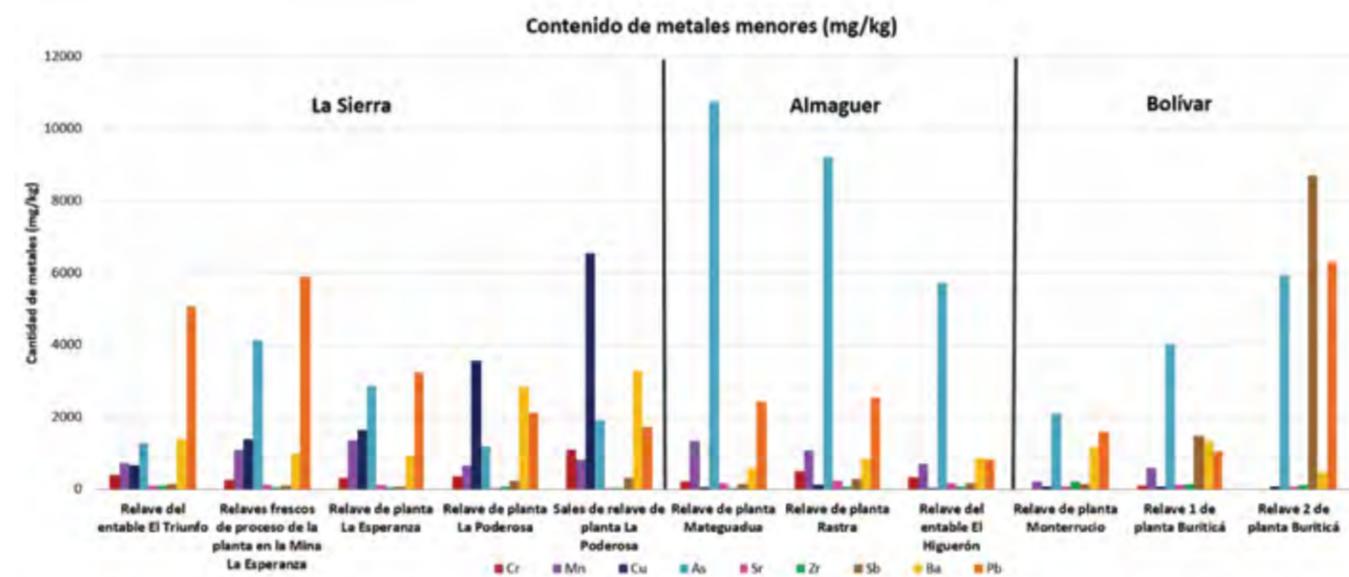
La presencia de silicio en las muestras cuantificadas se puede atribuir a la acumulación residual proveniente del material de cabeza procesado que contiene vetas de cuarzo, principalmente.

Figura 7.16. Composición de elementos mayores de los relaves situados en los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



Por otra parte, el contenido de azufre encontrado en los relaves de La Sierra arroja un rango de 11,74 a 19,76%, seguido de Almaguer, con un rango de 3,94 a 8,14%, mientras que en Bolívar apenas se reportaron valores entre 0,42 y 4,65%. Estos resultados concuerdan con los valores reportados sobre la composición del material de cabeza en la figura 7.17. Por otro lado, otro de los elementos que más abundan en La Sierra es el hierro, en un intervalo de 9,5 a 14%, mientras que en los otros municipios no supera el 5%. El zinc es otro elemento presente en La Sierra, con contenidos de 0,66 a 3,09%, quizá debido a la presencia de esfalerita, tal y como se comentó antes, y se relacionó con los valores reportados en el material de cabeza, que en este caso difiere de los reportados en los otros dos municipios, pues no se evidenció la presencia significativa de este elemento.

Figura 7.17. Contenido (en partes por millón) de elementos menores, o trazas, de los relaves situados en los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar, determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



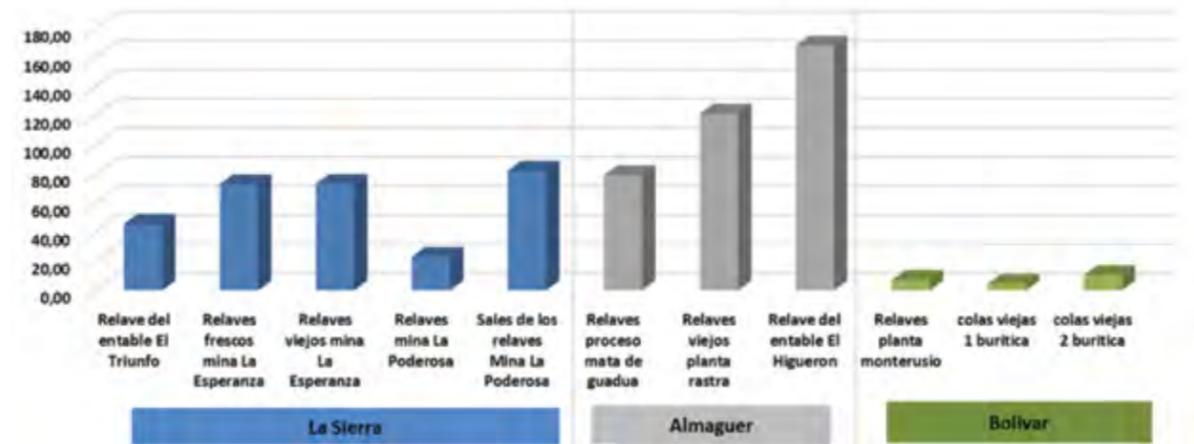
En cuanto a los elementos menores, o elementos traza, de los relaves, contenidos en partes por millón, uno de los más evidentes en los tres municipios es el arsénico; de hecho, es el elemento más relevante en el municipio de Almaguer, seguido de Bolívar y, por último, de La Sierra.

Uno de los elementos que más resaltan en los tres municipios es el plomo. En los relaves de las diferentes plantas de beneficio de La Sierra se mantiene una diferencia en los contenidos de este elemento, que oscila entre 1.600 y 6.000 ppm, mientras que en Bolívar oscila entre 800 y 6400 ppm, y en Almaguer, entre 800 y 2600 ppm.

Hay una presencia considerable de antimonio (8.695,55 ppm) en los relaves del municipio de Bolívar, mientras que en los otros dos municipios no hay evidencia por FRX de más de 300 ppm de este elemento.

Otro elemento que resalta es el cobre, en el municipio de La Sierra, mientras que en los otros dos municipios no se evidencia presencia significativa de este elemento. Los demás elementos que se muestran en la figura, bario, zirconio, estroncio, manganeso y cromo, no muestran un contenido significativo en comparación con los elementos anteriormente mencionados.

Figura 7.18. Determinación de mercurio en relaves. Fuente: autores.



En la Figura 7.18 se observan los resultados de la determinación de Mercurio en los relaves. La concentración máxima obtenida de mercurio fue de 82,39 mg/Kg para el relave de la planta La Poderosa en La Sierra, y 168,58 mg/Kg en El Higuierón en Almaguer y 10,38 Kg/mg en Buriticá en Bolívar. De acuerdo con investigaciones sobre lixiviación de compuestos tóxicos (García et al., 2015), la movilización de metales pesados como el mercurio depende de las características del suelo y del pH. Para uso agrícola, un suelo con pH inferior a 7 unidades, debe contener como máximo 1 mg/kg de Hg, y considerando la toxicidad en fauna y flora (Acosta, 2007) establece como nivel de toxicidad alta una concentración de Mercurio entre 1 y 3 mg/Kg. De esta manera, los relaves analizados podrían presentar condiciones desfavorables para ser empleados en otras actividades y para desarrollo óptimo de formas de vida.

7.4.3. PRUEBAS AMBIENTALES

7.4.3.1. DETERMINACIÓN DE LA TOXICIDAD POR LIXIVIACIÓN

La prueba TCLP (sigla de toxicity characteristics leaching procedure) se realizó a diez muestras correspondientes a relaves de distintas plantas de beneficio de oro del Cauca. A continuación se presenta la descripción de las muestras tomadas y los resultados de la determinación de plata (Ag), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), que son metales pesados de interés ambiental y se encuentran en la lista de contaminantes tóxicos del Decreto 4741 de 2005.

Figura 7.19. Concentraciones de elementos con potencial peligroso según la prueba TCLP. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | Pb (mg/L) | Ag (mg/L) | Cd (mg/L) | Cr (mg/L) | Hg (mg/L) |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Relave del entable El Triunfo | 20,80 | D.L.C. | 0,97 | 0,18 | 0,0027 |
| Relave del entable El Higuero | D.L.C. | D.L.C. | 0,26 | D.L.C. | 0,0011 |
| Relaves proceso Mateguadua | D.L.C. | D.L.C. | 0,10 | D.L.C. | 0,0021 |
| Relaves viejos planta Rastra | 11,65 | D.L.C. | 0,06 | D.L.C. | 0,0022 |
| Relaves planta Monterrucio | D.L.C. | D.L.C. | D.L.C. | D.L.C. | 0,0068 |
| Relaves viejos mina La Esperanza | D.L.C. | D.L.C. | 0,71 | D.L.C. | 0,0121 |
| Relave mina La Poderosa | 2,33 | 0,0208 | 0,40 | D.L.C. | D.L.C. |
| Sales de los relaves mina La Poderosa | D.L.C. | 0,2081 | 5,08 | 1,86 | D.L.C. |
| Colas viejas 1 Buriticá | 2,74 | 1,0955 | 0,09 | D.L.C. | D.L.C. |
| Colas viejas 2 Buriticá | 19,03 | D.L.C. | 0,08 | D.L.C. | D.L.C. |

ASS-Llama y GH-Fuente: SGC, (2018) D.L.C.: Debajo del límite de cuantificación

Los valores de los metales obtenidos al aplicar la prueba TCLP permiten conocer su liberación en el ambiente, al entrar en contacto con fases líquidas. Estos resultados se comparan con los límites permitidos por el Decreto 4741 de 2005, “Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral y se establecen las concentraciones máximas permisibles en la prueba para clasificar el residuo como peligroso o no peligroso”.

De acuerdo con los resultados presentados, los analitos cuantificados en las muestras de los relaves de El Higuero, Mateguadua, Monterrucio, La Poderosa y las colas viejas 1 de Buriticá se encuentran en concentraciones que no exceden los límites máximos permitidos establecidos en la norma colombiana. Por otro lado, los relaves de El Triunfo, Rastra, La Esperanza, las sales de los relaves de La poderosa y las colas viejas 2 de Buriticá presentan concentraciones apreciables en metales como plomo y cadmio.

En el lixiviado de El Triunfo, el contenido de plomo es de 20,7965 mg/L, que excede la norma colombiana en un 400%, ya que esta establece que, para este metal, el valor máximo permisible es de 5 mg/L. La concentración de cadmio, igual a 0,9729 mg/L, denota un alto riesgo, debido a que la norma establece un límite de 1 mg/L.

Asimismo, el lixiviado del relave de la planta Rastra presenta una alta concentración de plomo, equivalente a 11,6455 mg/L, que sobrepasa el límite en un 232%. De igual forma, las colas viejas 2 de Buriticá se pueden considerar residuos sólidos mineros tóxicos, dado que al realizar la prueba de lixiviación característica de toxicidad, presentan una concentración de plomo de 19,0324 mg/L, aunque cumplen con la norma colombiana en los demás analitos cuantificados.

En los relaves de La Esperanza se obtuvo una concentración de cadmio de 0,7151 mg/L. Aunque se encuentra por debajo del máximo permitido por el Decreto 4741 de 2005, no se descarta la posibilidad de que genere toxicidad, dado que se acerca a 1 mg/L. Por su parte, las sales de los relaves de La poderosa se consideran tóxicas debido a la elevada concentración de cadmio que se cuantificó (5,0845 mg/L).

La presencia de plata, plomo, cadmio, cromo, mercurio, arsénico y otros metales pesados puede constituir un riesgo tóxico para el ambiente y los seres humanos, dada su capacidad de producir efectos biológicos adversos, puesto que son susceptibles de bioacumularse y biomagnificarse en los seres vivos.

7.4.3.2. MERCURIO EN AGUAS SUPERFICIALES

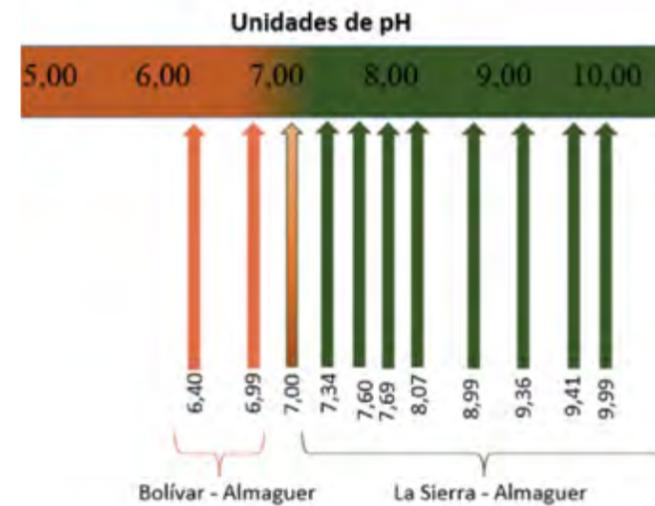
Los resultados obtenidos para mercurio en aguas superficiales indican que no hay presencia de este analito en las aguas recolectadas en las tres zonas La Sierra, Almaguer y Bolívar.

La determinación del valor de pH en las muestras de aguas superficiales tomadas en campo permite clasificar varios aspectos por la presencia de metales o por compuestos en los afluentes, ya sea un comportamiento ácido (pH < 7 hasta 1 unidad de pH) o básico (pH > 7 hasta 14 unidades de pH), cuya generación se puede atribuir, bien sea a las actividades de beneficio, o bien a la composición natural de los minerales

de la zona. En general, el comportamiento de las muestras líquidas tomadas en las zonas de estudio en los municipios de La Sierra, Almaguer y Bolívar osciló en un rango de 6,40 a 9,99 unidades de pH, con una tendencia básica del 91%.

7.4.3.3. CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS ACTIVOS

Figura 7.20. Rango de pH correspondiente a la zona minera. Fuente: autores.

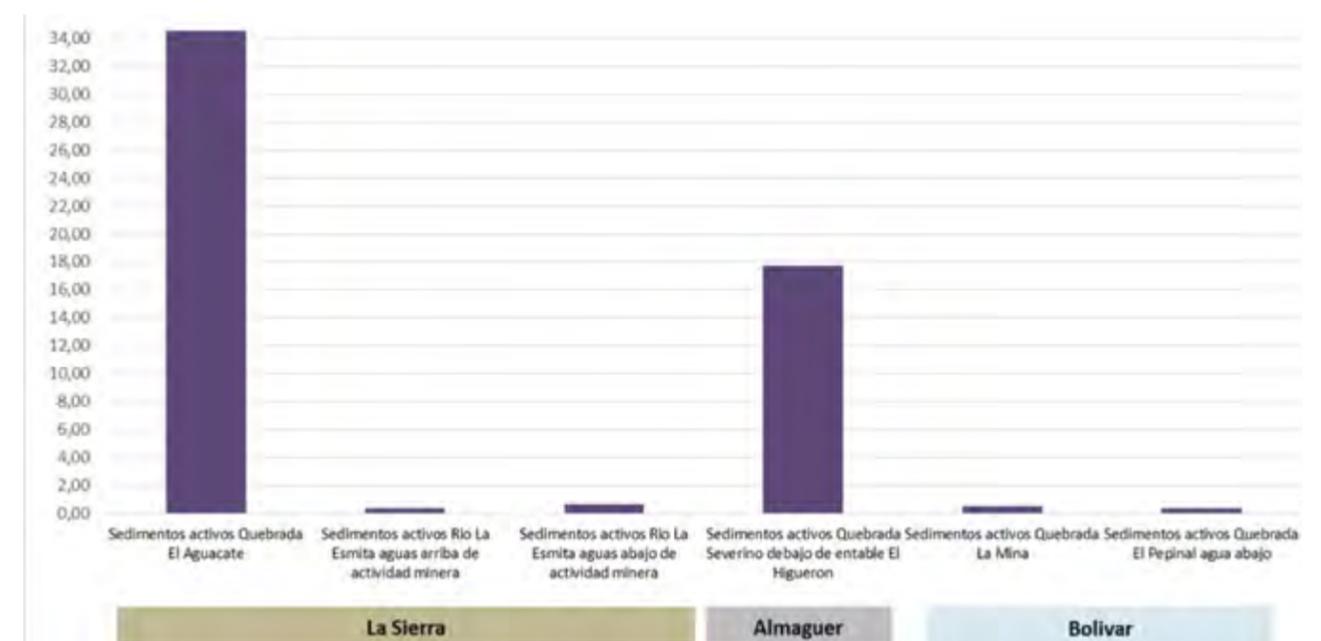


En el análisis de mercurio en fase sólida de los sedimentos activos muestreados se encontraron valores representativos en todos los puntos cuantificados. Dado que en Colombia no existe reglamentación de los niveles máximos permisibles de metales pesados en sedimentos activos ni en suelo, en general, 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 y 3 mg/L es tóxico para la flora y fauna, debido a la alteración de las funciones metabólicas de las plantas que produce, por lo cual los sedimentos muestreados tienen probabilidad de ser tóxicos para las especies vivas presentes en el medio.

MacDonald (2000) presenta valores de referencia del nivel de efecto umbral de mercurio TEC, por su sigla en inglés: threshold effect concentration,

para diferentes metales de interés ambiental; para el caso del mercurio, se recomienda una concentración de 180 µg/kg indicando ausencia de toxicidad. TEC se define como la concentración 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.

Figura 7.21. Determinación de mercurio en sedimentos activos. Fuente: autores.



7.4.3.4. VERTIMIENTOS EN LA ZONA

Mediante la técnica de generación de hidruros no se detectó mercurio en el vertimiento muestreado. Se determinó cianuro libre y total, del cual tampoco se detectó presencia. Las tablas presentadas a continuación muestran las concentraciones de cianuro y metales en el vertimiento.

Figura 7.22. Resultados de medición de metales de interés ambiental en el vertimiento muestreado. Fuente: autores. D.L.C.: Debajo del límite de cuantificación.

| DESCRIPCIÓN | mg/L | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------|----------|--------|------|------|------|--------|------|--------|--------|
| | CN-libre | CN total | Ag | Cu | Fe | Zn | Pb | Cd | Cr | Ni |
| Vertimiento a quebrada El Aguacate | D.L.C. | 0,0 | D.L.C. | 0,12 | 3,47 | 3,12 | D.L.C. | 0,11 | D.L.C. | D.L.C. |

Las concentraciones de metales no superan los valores máximos de descarga de mercurio y cianuro admitidos por la Resolución 631 del 2015. Se encontró que los valores de hierro, zinc y cadmio superan los establecidos en dicha norma. Es muy posible que el material procesado, por sus contenidos de minerales de hierro y zinc, haga un aporte significativo de estos elementos a este vertimiento.

7.4.3.5. BALANCE ÁCIDO BASE (TEST ABA) PARA DETERMINAR EL DAM

Uno de los ensayos de laboratorio para predecir el drenaje ácido de mina (DAM) es el test ABA modificado, con el que es posible establecer un balance de los componentes generadores y neutralizadores de drenaje ácido. Es un test estático con el que se obtiene la capacidad de generación de DAM sin indicar la medida en que se genera. Inicialmente se realiza el test Fizz para clasificar la muestra según su grado de efervescencia; posteriormente se establece el potencial de neutralización (PN) y el potencial de acidez (PA), y la diferencia entre estos valores da como resultado el potencial neto de neutralización (PNN). Con ello se determina la capacidad de la muestra de generar drenaje ácido de mina, según los criterios de clasificación DAM.

Potencial representado

Bajo o nulo potencial de generación de ácido
Potencial marginal de generación de ácido
Alto potencial de generación de ácido

Criterio de interpretación

$PNN > 20$ y $PN/PA > 3$
 $PNN < 20$ y $1 < PN/PA > 3$
 $PNN > 0$ y $PN/PA < 1$

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos del potencial de neutralización y el potencial de acidez, a partir de los cuales se establece el potencial neto de neutralización y se categoriza cada muestra como potencial o no potencial generadora de drenaje ácido de minas.

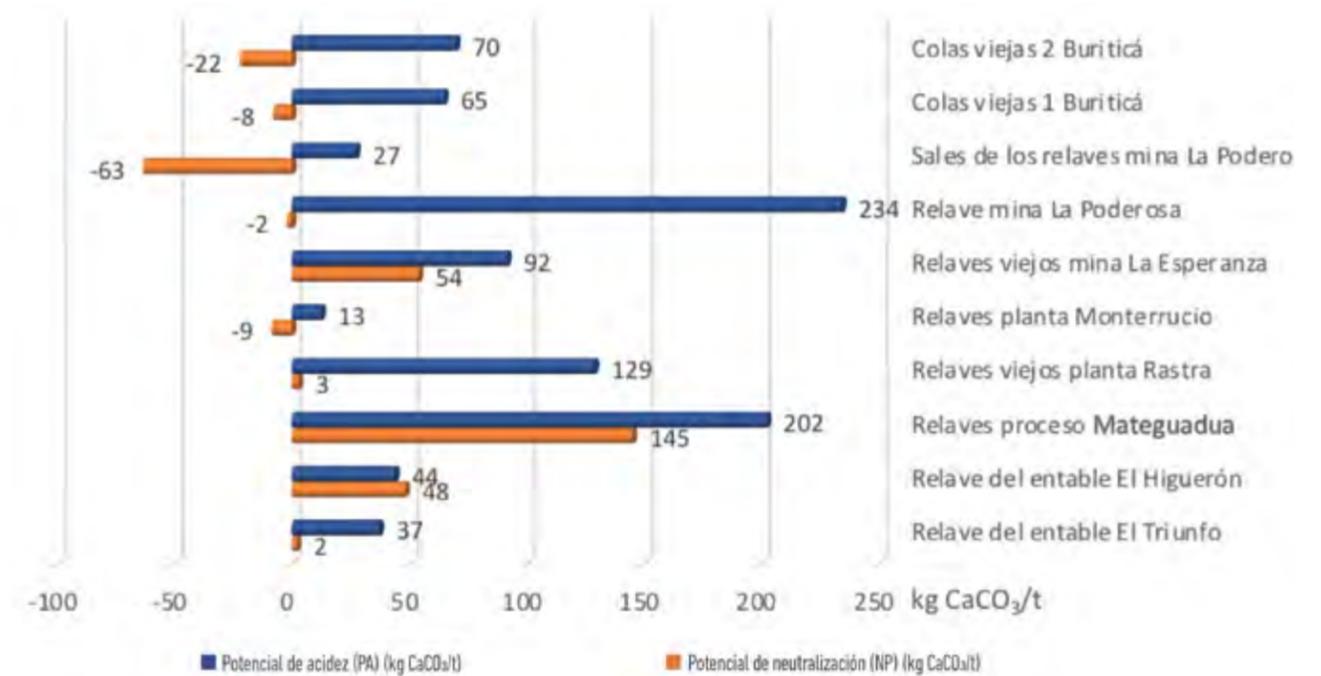
Figura 7.23. Resultados del test ABA. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN (Kg CaCO ₃ /t) (NP) | POTENCIAL DE ACIDEZ (Kg CaCO ₃ /t) (PA) | POTENCIAL NETO DE NEUTRALIZACIÓN (Kg CaCO ₃ /t) | CRITERIO (PN/PA) | RESULTADO |
|----------------------------------|--|--|--|------------------|---|
| Relave del entable El Triunfo | 2,1590 | 37,4094 | -35,2504 | 0,0577 | Alto potencial de generación de ácido |
| Relave del entable El Higuierón | 48,3830 | 44,0594 | 4,3236 | 1,0981 | Potencial marginal de generación de ácido |
| Relaves proceso Mateguadua | 145,2940 | 202,3375 | -57,0435 | 0,7181 | Alto potencial de generación de ácido |
| Relaves viejos planta Rastra | 2,9197 | 129,0250 | -126,1053 | 0,0226 | Alto potencial de generación de ácido |
| Relaves planta Monterrucio | -8,5529 | 12,5281 | -21,0810 | -0,6827 | Alto potencial de generación de ácido |
| Relaves viejos mina La Esperanza | 54,1894 | 91,7375 | -37,5481 | 0,5907 | Alto potencial de generación de ácido |
| Relave mina La Poderosa | -2,0261 | 234,4344 | -236,4605 | -0,0086 | Alto potencial de generación de ácido |
| Sales de los relaves La Poderosa | -63,3128 | 27,4000 | -90,7128 | -2,3107 | Alto potencial de generación de ácido |
| Colas viejas 1 Buriticá | -7,8566 | 64,8531 | -72,7098 | -0,1211 | Alto potencial de generación de ácido |
| Colas viejas 2 Buriticá | -22,0472 | 69,8719 | -91,9191 | -0,3155 | Alto potencial de generación de ácido |

En los resultados del test ABA presentados, y en la gráfica de la figura 4.23, se evidencia un potencial de acidez elevado en las muestras analizadas, potencial que mantiene una relación directa con los reportes de fluorescencia de rayos X (FRX) presentados en la figura, en los que se observan concentraciones apreciables de sulfuros polimetálicos y bajas concentraciones de carbonatos en las zonas visitadas de los municipios La Sierra, Almaguer y Bolívar.

Dado el resultado del potencial de acidez y el de neutralización, se tiene un potencial neto de neutralización, indicador del balance de acidez-basicidad, inferior a 20 kg CaCO₃/t (CIMM T&S, 2007), y una relación de estos inferior a 3, lo cual indica que las muestras tienen baja capacidad de neutralización de acidez (Morales, 2003). Así, se espera que, debido a la exposición ambiental de los minerales presentes en los relaves, se generen sustancias ácidas que solubilizan los metales contenidos en las rocas y drenen a fuentes hídricas cercanas, con lo cual resultarían contaminadas por la acumulación de metales pesados o por el pH bajo.

Figura 7.24. Resultados de aplicación del test ABA modificado Fuente: autores.



Los resultados del test ABA indican que todas las muestras de relaves tomadas en las plantas de beneficio de oro de Almaguer, La Sierra y Bolívar presentan un alto potencial de generación de drenaje ácido de minas. Se hace una excepción con la muestra tomada en la planta Mateguadua, ubicada en el municipio de Almaguer, cuya relación entre el potencial de neutralización y de acidez es 1, y el potencial neto de neutralización es < 20 kg CaCO₃/t, lo que indica que su potencial de generación de DAM es incierto. Este resultado está relacionado con la presencia de carbonatos de calcio, como calcita, que reaccionan con el ácido generado por los sulfuros polimetálicos y neutraliza en cierto grado la acidez del medio.

El relave de El Higuierón presenta una característica particular, pues existe un potencial de neutralización y de acidez semejantes que, al ser sometidas las pruebas al test ABA modificado, no dan certeza de la generación de DAM. En este caso es recomendable usar test dinámicos con los que pueda llegarse a un resultado más claro.

Dadas los pH de la pasta de las muestras de las plantas La Poderosa y Buriticá, que son inferiores a 4 unidades, es de esperarse que presenten un alto potencial de generación de DAM, puesto que se trata de muestras cuya composición mineralógica es alta en sulfuros en forma de piritita (FeS₂), que está en mayor concentración en todas las zonas, y dada la presencia de arsenopiritita (FeAsS), calcopiritita (CuFeS₂), esferalerita (ZnS) y galena (PbS), que les confieren una naturaleza ácida. En contraste, el contenido de minerales capaces de neutralizar la acidez generada por los minerales mencionados es bajo, de manera que el balance ácido base tiende a ser negativo.

Igual ocurre con las muestras de relaves de las plantas El Triunfo, El Higuierón, Rastra, Monterrucio y La Esperanza, cuyo pH de pasta es ligeramente ácido, tendiente a la neutralidad, y que presentan efervescencia de leve a fuerte, con excepción de Monterrucio, cuya efervescencia es nula, lo que indica un bajo contenido de carbonatos. Una vez realizado el balance, se establece que es mayor la concentración de sulfuros polimetálicos que al entrar en contacto con el oxígeno se oxidan, y debido a las precipitaciones generan ácido que drena a las fuentes de agua cercanas y afectan la flora, fauna, el paisaje y el suelo.

Figura 7.25. Mapa de ubicaciones de muestras y resultados relevantes del municipio de La Sierra. 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

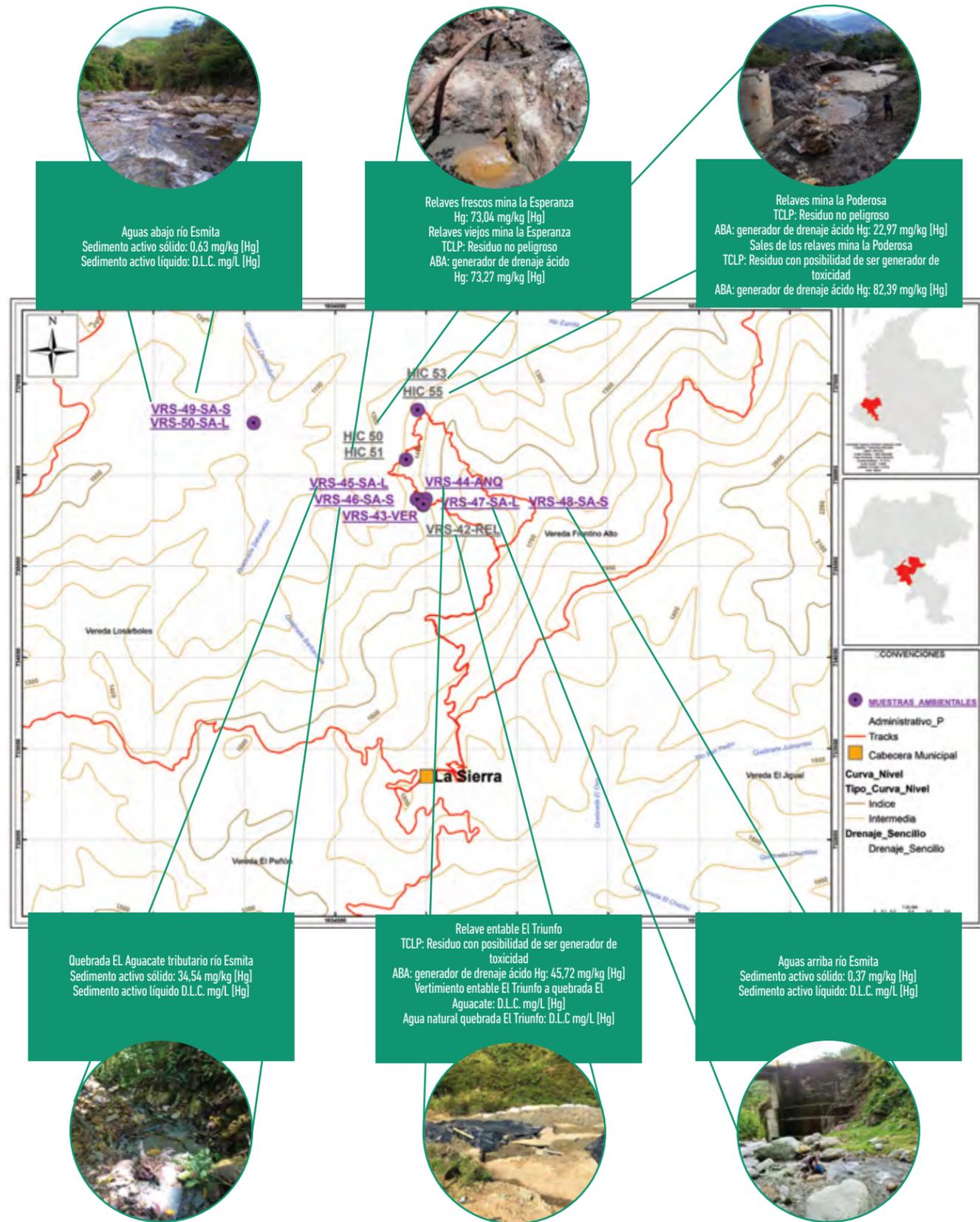


Figura 7.26. Mapa de ubicaciones de muestras y resultados relevantes del municipio de Almaguer. Fuente: autores.
SA-S: sedimento activo fase sólida **SA-L:** sedimento activo fase líquida **REL:** relave **VER:** vertimiento **ANQ:** agua natural quebrada **AN:** agua nacimiento

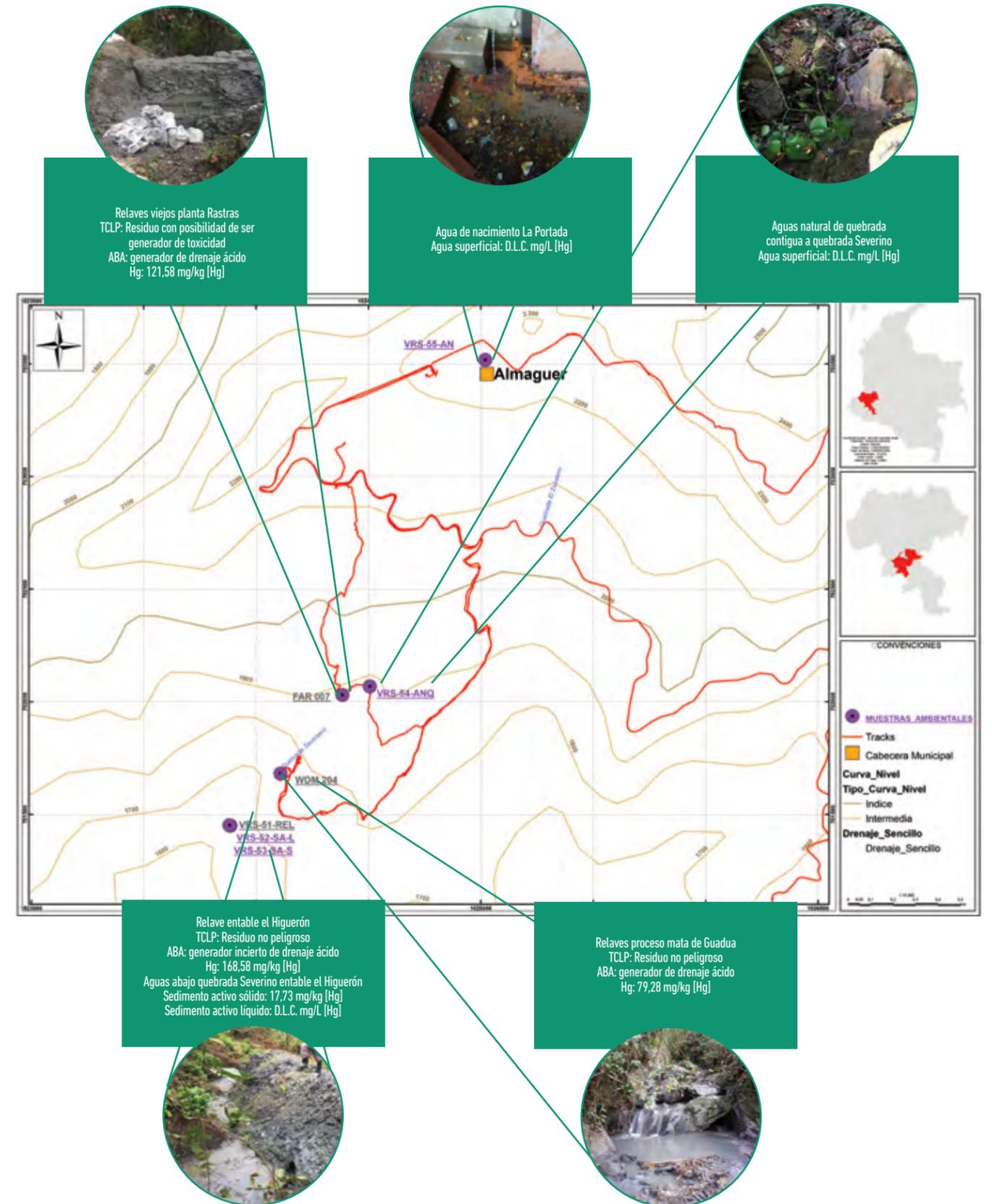
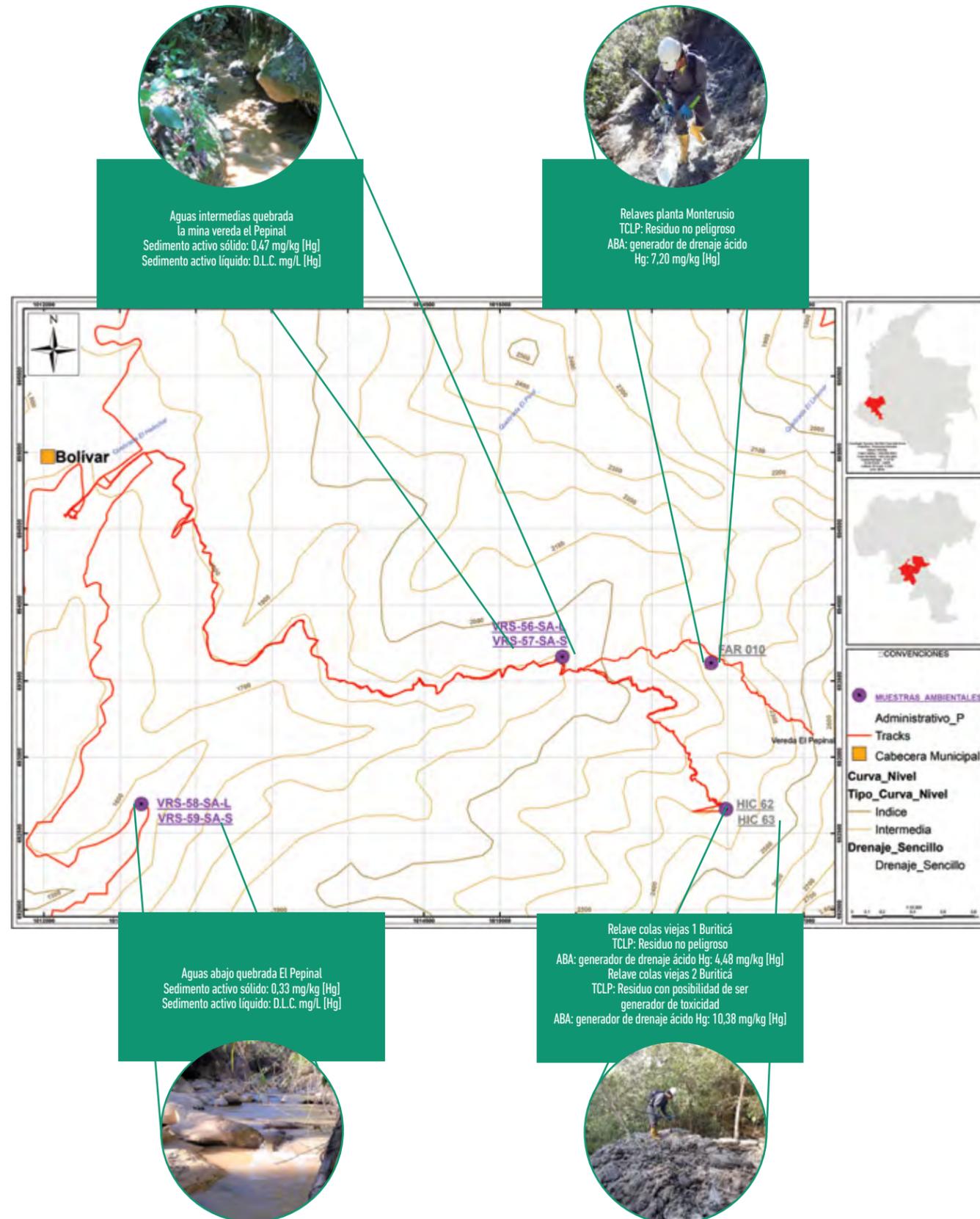


Figura 7.27. Mapa de ubicaciones de muestras y resultados relevantes del municipio de Bolívar. Fuente: autores.
SA-S: sedimento activo fase sólida **SA-L:** sedimento activo fase líquida **REL:** relave **VER:** vertimiento **ANQ:** agua natural quebrada **AN:** agua nacimiento



7.6. CONCLUSIONES QUÍMICAS Y AMBIENTALES

- A partir de los resultados de FRX se logró determinar que en el municipio de La Sierra hay una concentración más elevada de azufre que los valores de hierro y zinc encontrados; en consecuencia, se puede deducir que hay presencia de pirita FeS_2 y esfalerita ZnS , principalmente. También se logró determinar la presencia de otros elementos, como Si, Al, K y Ca, con concentraciones significativas, que sugieren la presencia de aluminosilicatos, feldespatos y carbonatos. Con respecto al arsénico, se pudo concluir que posiblemente hay un bajo contenido de arsenopirita.
- Se logró determinar que en el municipio de Almaguer predominan los elementos de silicio y calcio, que probablemente corresponden a la presencia de cuarzo y carbonato. También se determinó la presencia de otros elementos, como Si, Al y K, con concentraciones significativas que sugieren la presencia de aluminosilicatos y feldespatos. Con respecto al arsénico (7,90%), hierro (20,76%) y azufre (25,23%), se pudo concluir que posiblemente hay un contenido significativo de arsenopirita y pirita, que principalmente estaría relacionada con la planta de la mina Mateguadua.
- Se determinó que en el municipio de Bolívar predomina tanto el silicio como el hierro, con un bajo contenido de azufre, lo que probablemente corresponde a la presencia de cuarzo, pirita y óxidos de hierro. También se encontró aluminio con concentraciones significativas que sugieren la presencia de aluminosilicatos, mientras que, con respecto al arsénico, se pudo concluir que posiblemente hay un contenido bajo de arsenopirita.
- En cuanto al contenido de elementos menores, o trazas, se encontró principalmente plomo (Pb) y titanio, que se pueden relacionar con la mineralización de la galena (PbS) y con rocas hospedantes ricas en titanio provenientes de magmas alcalinos.
- El mayor contenido de plomo se encontró principalmente en el entable El Triunfo, del municipio de La Sierra (25.163,19 mg/kg) y en la planta Monterucio, del municipio de Bolívar (15.757,45 mg/kg); sin embargo, el municipio que presenta concentraciones de plomo más significativas en el material de cabeza de proceso en todas las plantas es La Sierra; en Almaguer se evidenció la presencia de plomo en menor concentración.
- En los municipios de La Sierra y Bolívar, el contenido de cobre determinado por FRX como elemento traza, y su relación con hierro y azufre determinados como elementos mayores, sugiere la mineralización de calcopirita.
- El comportamiento básico de las aguas superficiales muestreadas en los municipios de La Sierra y Almaguer es concordante con la presencia significativa de compuestos alcalinos cuantificados en la caracterización mineralógica de los sedimentos activos de los afluentes y los materiales de proceso que influyen en las fuentes hídricas estudiadas.
- La alcalinidad de los afluentes analizados no favorece la movilidad de los metales pesados, principalmente el mercurio, por lo cual, aun presentándose concentraciones de mercurio en los sedimentos activos de los afluentes muestreados, las aguas superficiales de los mismos puntos no contienen el metal.
- 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, en todos los casos, un potencial de acidez elevado aportado por los sulfuros polimetálicos presentes en los relaves, que sufren procesos de oxidación y posterior formación de ácido sulfúrico, que modifica el pH natural de las fuentes de agua a las cuales drena, y afecta la fauna, la flora y el paisaje.
- 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 normativa colombiana, estos materiales se pueden categorizar como peligrosos, por

su nivel de toxicidad, puesto que tienen la capacidad de causar efectos biológicos indeseables o adversos en la salud humana y el ambiente. En este sentido, al realizar la prueba de lixiviación característica de toxicidad se encontró que los relaves de El Triunfo, Rastra, las sales de los relaves de La poderosa y las colas viejas 2 de Buriticá presentan concentraciones apreciables de metales como plomo y cadmio, que sobrepasan los límites permitidos establecidos en el Decreto 4741 de 2005.

- Los sedimentos son un medio de transporte natural del mercurio y facilitan su dispersión, especialmente en áreas cercanas a las bocaminas (Martínez et al., 2013). Los sedimentos activos muestreados presentan concentraciones altas de mercurio, cuyo máximo (34,54 mg/kg) se encontró en la quebrada El Aguacate, en La Sierra. Aunque en Colombia no hay una normativa ambiental que establezca los valores que permitan definir suelos contaminados por mercurio, existen valores de referencia de niveles permisibles en México, de 23 mg/kg para uso agrícola y 310 mg/kg para uso industrial (NOM -147-SERNAT/SSA1-2004); entre 0,08 y 1,40 mg/kg en suelo agrícola, rango establecido por la Community Bureau of Reference (BCR) SRM 2709 (Acosta et al., 2011) y de 0,07-0,3 mg/kg definidos en el marco del Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (Pirrone et al., 2001).
- Adicionalmente, Según Forstner (1977) y Salomons y Forstner (1984), concentraciones máximas normales en sedimentos lacustres no contaminados no debe superar los 350 ppb. Los valores encontrados superan los máximos normales para que la biota y la fauna logren estar en un ambiente adecuado. Por ello es necesario tomar medidas preventivas para que la dispersión del mercurio contenido en los materiales de proceso que provienen de amalgamación no intervenga en el ecosistema.

7.7. RECOMENDACIONES QUÍMICAS Y AMBIENTALES

- Se recomienda que los relaves no se dispongan en terrenos con pendiente, con el fin de evitar el rodamiento del material sólido y el vertimiento de los lixiviados a los acuíferos cercanos.
- Los relaves deben tener una estructura controlada que permita un almacenamiento adecuado, de tal modo que se impida la movilidad de metales. Como protección general se hace una impermeabilización del suelo de los relaves, que se trata con matrices básicas, como cal, entre capas de material residual, y preferiblemente se mantienen cubiertos, no expuestos al agua.
- Es necesario adecuar un espacio para la sedimentación de los sólidos residuales de los procesos de beneficio, lo que permite la recirculación de aguas sobrenadantes y evita los consumos excesivos de captación.
- Se debe controlar la zona utilizada para el material de descargue de los frentes de explotación, con el objeto de evitar la alteración del entorno y el aumento de los sólidos suspendidos en las fuentes hídricas.
- Dadas las condiciones en que 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.
- Se recomienda realizar ensayos dinámicos para predicción de drenaje ácido de minas con el objeto de obtener información cuantitativa de este fenómeno, a partir de la cual se pueda definir con mayor certeza si un residuo minero tiene la capacidad de neutralizar la acidez generada por exposición de sulfuros polimetálicos en el ambiente.

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.

Detalle de tanque para cianuración y propulsores. Fotografía tomada por Fabián Ramírez , Servicio Geológico Colombiano



8.1. PROCESO DE BENEFICIO DESARROLLADO ACTUALMENTE

A continuación se presentan los diagramas de los procesos de beneficio encontrados en la zona de La Sierra, Almaguer y Bolívar:

8.1.1. ALMAGUER

El proceso de beneficio se encuentra limitado a la concentración gravimétrica en canalones y recuperación de oro por medio de amalgamación en barriles, y elutriador como medio colector de mercurio y amalgama.

Se aprecia que no existen procesos de conminución diseñados (trituración primaria, trituración secundaria, molienda, clasificación): el mineral pasa de la trituración primaria a los barriles (molino y amalgamador).

Las colas de proceso y relaves antiguos presentan tenores de oro con valores que pueden ser recuperados.

No existen procesos de concentración por flotación, ni de concentración gravimétrica con equipos mecanizados (mesas, jig, etc.).

Figura 8.1. Diagramas de beneficio en plantas del municipio de Almaguer.

8.1.2. LA SIERRA

La recuperación de oro se realiza mediante amalgamación en barriles.

Solo en la planta de La Poderosa, se encontró un proceso de conminución que involucra trituración primaria (trituradora de quijadas), trituración secundaria (trituradora de martillos) y molienda (molino de bolas).

Se encontraron tenores de más de 10 g/t en las colas de proceso y relaves viejos.

No existen procesos de concentración por flotación, ni de concentración gravimétrica con equipos mecanizados (mesas, jig, etc.).

8.1.3. BOLÍVAR

El oro es recuperado por concentración gravimétrica. El procedimiento está limitado a la recuperación de oro libre y de gran tamaño.

Figura 8.1. Diagrama de beneficio actual Almaguer. Fuente: autores.

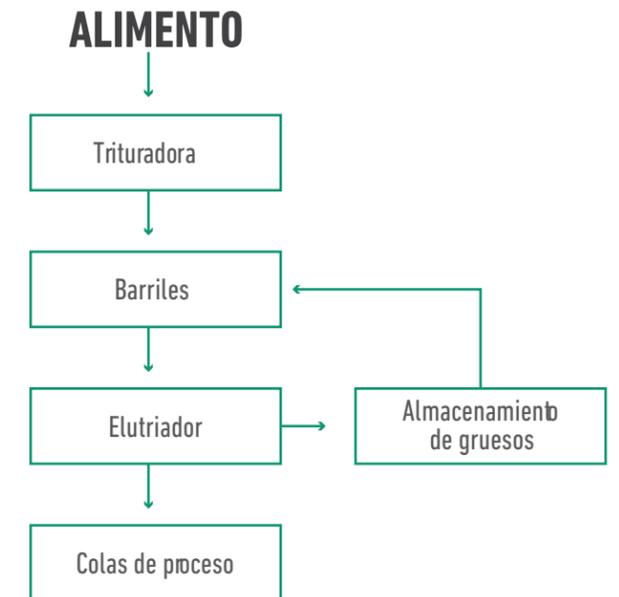
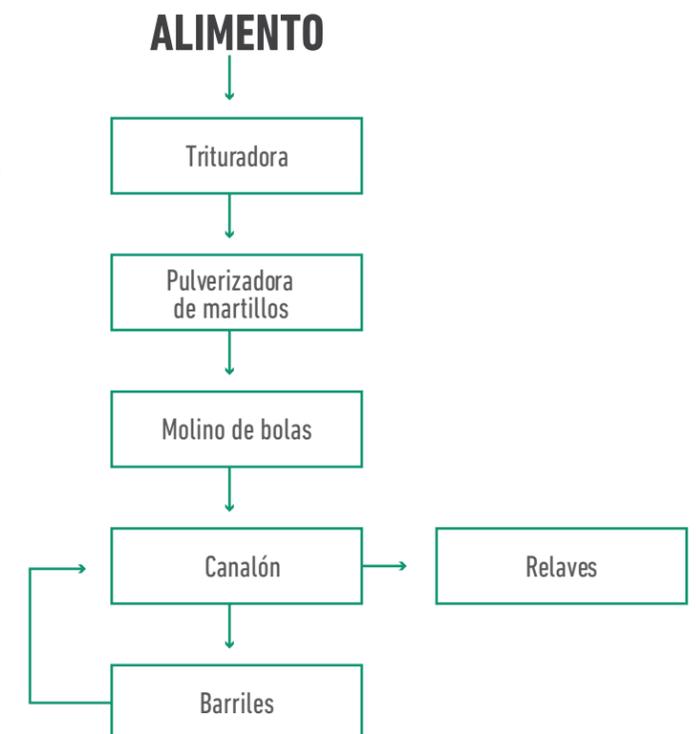


Figura 8.2. Diagrama de beneficio actual La Sierra. Fuente: autores.



En la planta de Buriticá (La Concordia) se encontró un proceso de conminución constituido por una trituradora de quijadas y un molino chileno.

Las cabezas de proceso son muy variables en tenor: van desde 2 g/t hasta 10 g/t, normalmente, y en momentos se enriquecen hasta alcanzar tenores de hasta 150 g/t, momento favorable para la concentración gravimétrica.

No existen procesos de concentración por flotación ni de concentración gravimétrica con equipos mecanizados (mesas, jig, etc.)

8.2. TENORES DE ORO EN LAS PLANTAS VISITADAS

La tabla enlista los tenores de oro de las muestras tomadas en las plantas de beneficio visitadas

Figura 8.4. Tabla de tenores para plantas del municipio de La Sierra (Cauca). Fuente: autores.

| PLANTA DE BENEFICIO - MUNICIPIO DE LA SIERRA | TENOR |
|--|--------|
| PLANTA EL TRIUNFO | |
| Relave en el entable El Triunfo | 8,42 |
| Producto de barriles en el entable El Triunfo | 67,39 |
| Pozo 2, El Triunfo | 29,17 |
| Cabeza de proceso en el entable eEl tTriunfo | 31,41 |
| PLANTA LA LINDA | |
| Cabeza de proceso en la mina La Linda | 24,40 |
| PLANTA LA ESPERANZA | |
| Relaves frescos en la mina La Esperanza | 25,341 |
| Relaves viejos en la mina La Esperanza | 14,35 |
| Cabeza de proceso en la mina La Esperanza | 80,64 |
| PLANTA LA PODEROSA | |
| Relaves en la mina La Poderosa | 13,20 |
| Cabeza de proceso en la mina La Poderosa | 12,88 |
| Salas de los relaves de la mina La Poderosa | 15,34 |
| Frete de explotación muestra de mano, mina La Poderosa | 12,81 |
| PLANTA EL MANGO | |
| Cabeza de proceso en la mina El Mango | 17,54 |
| PLANTA EL HIGUERÓN | |
| Cabeza de proceso en la mina El Higuierón | 18,51 |
| PLANTA EL HATO | |
| Cabeza de proceso en la mina El Hato | 5,42 |
| Colas de proceso en la mina El Hato | 87,65 |

Figura 8.3. Diagrama de beneficio actual Bolívar. Fuente: autores.

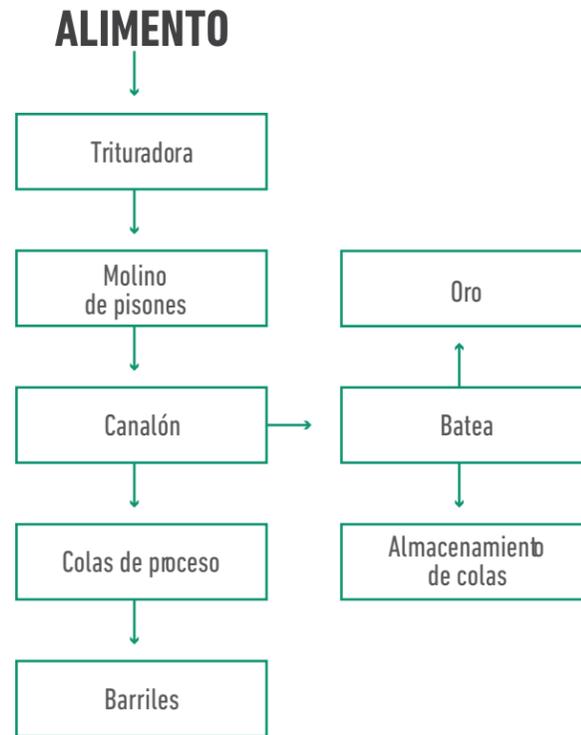


Figura 8.5. Tabla de tenores para plantas del municipio de Bolívar (Cauca). Fuente: autores.

| PLANTA DE BENEFICIO - MUNICIPIO DE BOLÍVAR | TENOR |
|--|--------|
| PLANTA MINA VIEJA | |
| Colas de proceso en Mina Vieja | 7,120 |
| PLANTA MONTERRUCIO | |
| Concentrado de canalón pasado por batea (colas de batea), Monterrucio | 27,64 |
| Colas de proceso en la planta Monterrucio | 1,08 |
| Relaves en la planta Monterrucio | 6,52 |
| Cabeza de proceso en la planta Monterrucio | 158,55 |
| PLANTA COOPERATIVA BOLÍVAR | |
| Filón fresco de la mina La Cooperativa | 0,72 |
| Filón superficial de la mina La Cooperativa | 7,91 |
| Colas de proceso en la mina La Cooperativa | 1,62 |
| PLANTA BURITICÁ | |
| Cabeza de proceso en la planta Buriticá | 1,96 |
| Concentrado de molino y canalón en la planta Buriticá | 12,28 |
| Colas frescas en la planta Buriticá | 20,46 |
| Colas viejas 1 Buriticá | 8,746 |
| Colas viejas 2 Buriticá | 13,09 |
| PLANTA LA MINA | |
| Colas de concentrado en la mina La Mina | 40,36 |
| PLANTA PUERTA GUADUA | |
| Cabeza de proceso en la mina Puerta de Guadua | 1,300 |
| Colas de concentrado en la mina Puerta de Guadua | 7,039 |

Figura 8.6. Tabla de tenores para plantas del municipio de Almaguer (Cauca). Fuente: autores.

| PLANTA DE BENEFICIO - MUNICIPIO DE ALMAGUER | TENOR |
|---|--------|
| PLANTA MATA DE GUADUA | |
| Colas de proceso en la mina Mata de Guadua | 27,38 |
| Relaves proceso en la mina Mata de Guadua | 8,405 |
| Cabeza de proceso en la mina Mata de Guadua | 14,60 |
| Cabeza de proceso en la mina Mata de Guadua 2 | 31,84 |
| PLANTA PALO VERDE | |
| Cabeza de proceso en la mina Palo Verde | 22,57 |
| PLANTA EL HIGUERÓN | |
| Cabeza de proceso en la planta El Higuierón | 34,45 |
| Mineral molido obtenido en pozo para segunda molienda | 30,090 |
| Relave del entable El Higuierón | 6,69 |
| PLANTA LOS BALSOS | |
| Cabeza de proceso en la planta Los Balsos | 8,10 |
| PLANTA RASTRA | |
| Cabeza de proceso en la planta Rastra | 9,05 |
| Colas de proceso en la mina Rastra | 26,68 |
| Relaves viejos en la planta Rastra | 12,50 |

8.3. PRUEBAS METALÚRGICAS DE LABORATORIO

8.3.1. PESO ESPECÍFICO, ÍNDICE DE HARDGROVE EN ÍNDICE DE TRABAJO DE BOND (WI)

Figura 8.7. Densidades de la planta del Higuierón, La Poderosa y Monterrusio. Fuente: autores.

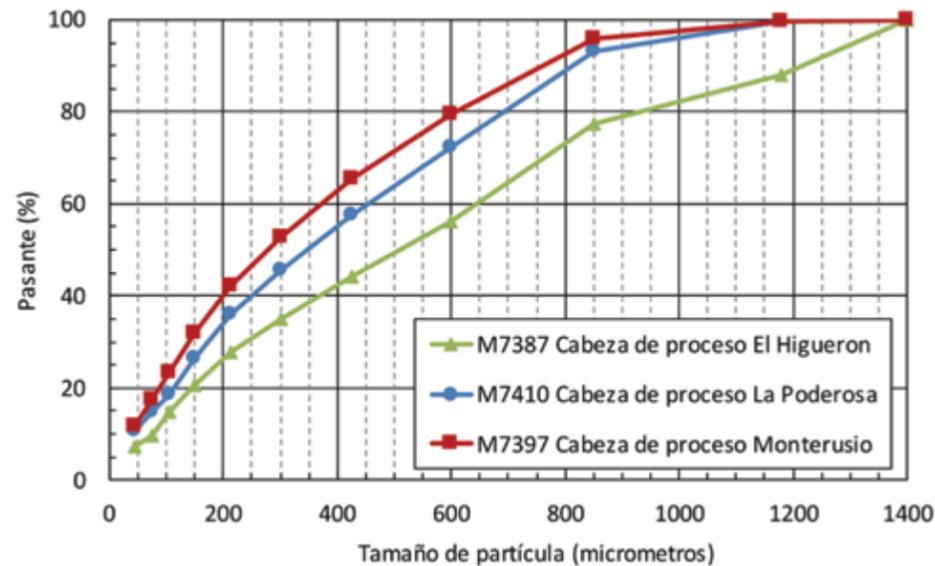
| MUESTRA | PESO DE PICNÓMETRO (W1) | PESO DE MUESTRA | PESO DEL PICNÓMETRO + SOLIDO (W2) | PESO PICNÓMETRO + AGUA + SOLIDO (W3) | PESO PICNÓMETRO AGUA (W4) | DENSIDAD MATERIAL (PS) | GRAVEDAD ESPECÍFICA | PROMEDIO DENSIDAD |
|-------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|-------------------|
| Higuierón | 34,9363 | 7,6368 | 42,5731 | 90,2966 | 85,3658 | 2,8139886 | 2,822 | 2,804 |
| Higuierón | 36,9276 | 7,4338 | 44,3614 | 89,5018 | 84,736 | 2,7782016 | 2,786 | |
| Poderosa | 34,9362 | 5,9364 | 40,8726 | 89,1602 | 85,356 | 2,7760925 | 2,784 | 2,773 |
| Poderosa | 36,9261 | 10,6243 | 47,5504 | 91,5056 | 84,7277 | 2,754131 | 2,762 | |
| Monterrusio | 35,0624 | 13,3577 | 48,4201 | 91,6744 | 82,8602 | 2,931 | 2,9400 | 2,9667 |
| Monterrusio | 37,3492 | 7,405 | 44,7542 | 90,5066 | 85,5754 | 2,985 | 2,9934 | |

Figura 8.8. Índices Hargrove de las plantas beneficio de La Poderosa, higuierón y Monterrusio. Fuente: autores.

| MUESTRA | PESO DE REFERENCIA (g) | PESO DEL MATERIAL > 75 MICRONES (SOBRE MALLA 200) | PESO DEL MATERIAL < 75 MICRONES (BAJO MALLA 200) | PERDIDA | ÍNDICE HARDGROVE | ÍNDICE DE BOND |
|-------------|------------------------|---|--|---------|------------------|----------------|
| Poderosa | 50,4 | 41,2000 | 8,800 | 0,4000 | 73,9840 | 7,1073 |
| Higuierón | 50,4 | 43,6000 | 6,600 | 0,2000 | 58,7380 | 8,9520 |
| Monterrusio | 50,4 | 42,9000 | 7,200 | 0,3000 | 62,8960 | 8,3602 |

8.3.2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE LAS MUESTRAS PREPARADAS

Figura 8.9. Distribuciones de tamaños de partícula de los minerales de cabeza de proceso preparados < 1,18 mm de El Higuierón, La Poderosa y Monterrusio. Fuente: autores.



8.3.3. ACONDICIONAMIENTO DEL MINERAL PARA CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

Figura 8.10. Distribuciones de tamaño de partícula para la muestra inicial y el producto (alimentación de la mesa Wilfley) para el mineral de El Higuierón. Fuente: autores.

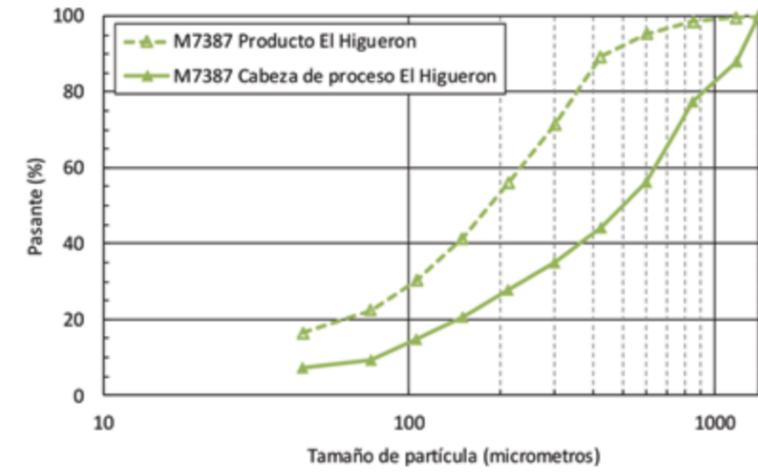


Figura 8.11. Distribuciones de tamaño de partícula para la muestra inicial y el producto (alimentación de la mesa Wilfley) para el mineral de La Poderosa. Fuente: autores.

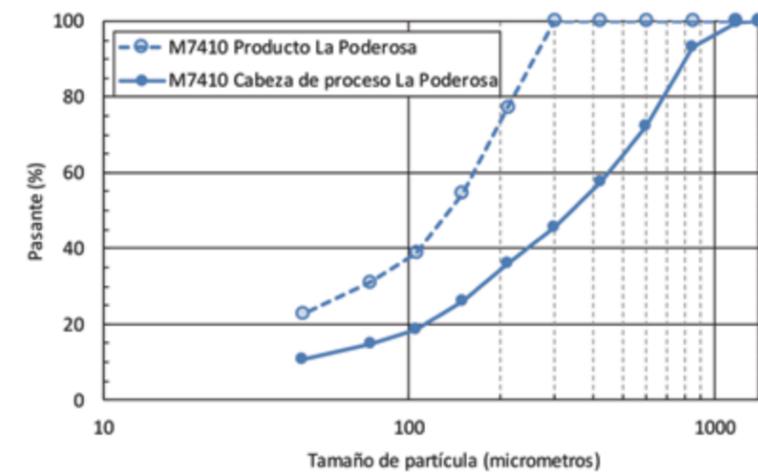
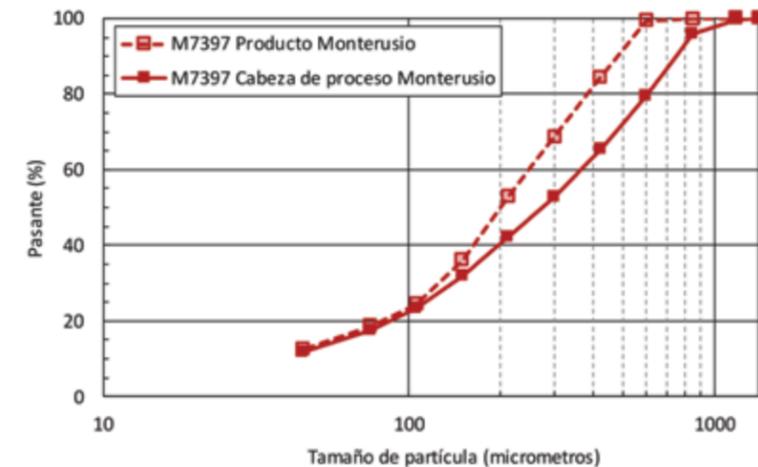


Figura 8.12. Distribuciones de tamaño de partícula para la muestra inicial y el producto (alimentación de la mesa Wilfley) para el mineral de Monterrusio. Fuente: autores.



8.3.4. PLANTA DE BENEFICIO HIGUERÓN

Concentración en mesa del mineral de cabeza de la Mina Higuerón

Cabeza: Cabeza de proceso Higuerón
Molienda hasta d80 =425 micrómetros
Tiempo de concentración: 10 minutos
Agua de fluidización: 4,67 L/m

Figura 8.13. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza de la mina Higuerón. Fuente: autores.

| IDENTIFICACIÓN | Peso (g) | % Peso | Tenor Au (g/t) | peso Au (µg) | % Recuperación | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Cabeza | 2582,1 | 100,0 | 43,23 | 111628,9 | | |
| Concentrado 1 | 174,5 | 6,76% | 419,0 | 73115,5 | 65,5% | 9,69 |
| medios | 1810,8 | 70,13% | 12,9 | 23359,3 | 20,9% | |
| Colas | 476,7 | 18,46% | 8,8 | 4195,0 | 3,8% | |
| Concentrado 2 | 120,1 | 4,65% | 91,3 | 10959,1 | 9,8% | 2,11 |

Refinación en batea

Cabeza: Concentrados del ensayo de mesa Wilfley Higuerón
Molienda hasta d80 =425 micrómetros
Tiempo de concentración: 5 minutos

Figura 8.14. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina Higuerón. Fuente: autores.

| IDENTIFICACIÓN | PESO (g) | % PESO | TENOR AU (g/t) | PESO AU (µg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|---------------------------------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Cabeza (compost concentrados de mesa) | 206,3 | 100,0 | 267,27 | 55138,64 | | |
| Concentrado | 17,6 | 8,53% | 1876,31 | 33023,00 | 59,89% | 7,0 |
| Colas | 188,7 | 91,47% | 117,20 | 22115,64 | 40,11% | |

Concentración por flotación

Medios y colas de Mesa

Cabeza: Medios y colas del ensayo de mesa Wilfley La Cirila
Molienda hasta d80 =75 micrómetros
Tiempo de acondicionamiento: 6 minutos
Tiempo de espumación: 9, 14 y 20 minutos

Figura 8.15. Resultados concentración por flotación de los medios y colas del ensayo de mesa de la planta Higuerón. Fuente: autores.

| | TIPO | PESO (g) | % PESO | TENOR Au (g/t) | PESO Au (µg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|----------------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Colas de mesa | Cabeza | 143,1 | 100,0 | 8,91 | 1275 | | |
| | Concent 1. min | 9,8 | 6,85 | 38,47 | 377,0 | 54,61 | 4,31 |
| | concent 2. min | 8,3 | 5,80 | | 319,3 | | |
| Medios de mesa | Colas | 125 | 87,35 | 4,63 | 578,8 | 45,39% | |
| | Cabeza | 228,1 | 100,0 | 14,14 | 3225,0 | | |
| | Concentrado 1. 9min | 20,4 | 8,94 | 58,59 | 1195,3 | 80,67 | 4,14 |
| | Concentrado 2. 14min | 11,5 | 5,04 | | 673,8 | | |
| Medios de mesa | Concentrado 3. 20min | 12,5 | 5,48 | | 732,4 | | |
| | Colas | 183,7 | 80,53 | 3,39 | 623,5 | 19,33% | |

Cianuración

Figura 8.16. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta Higuerón. 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 | 7,88 | 2,06 | 24 | 75 |
| Colas de batea | 5,53 | 2,07 | 24 | 75 |

Figura 8.17. Lixiviación de oro por cianuración para los concentrados de flotación planta Higuerón. Fuente: autores.

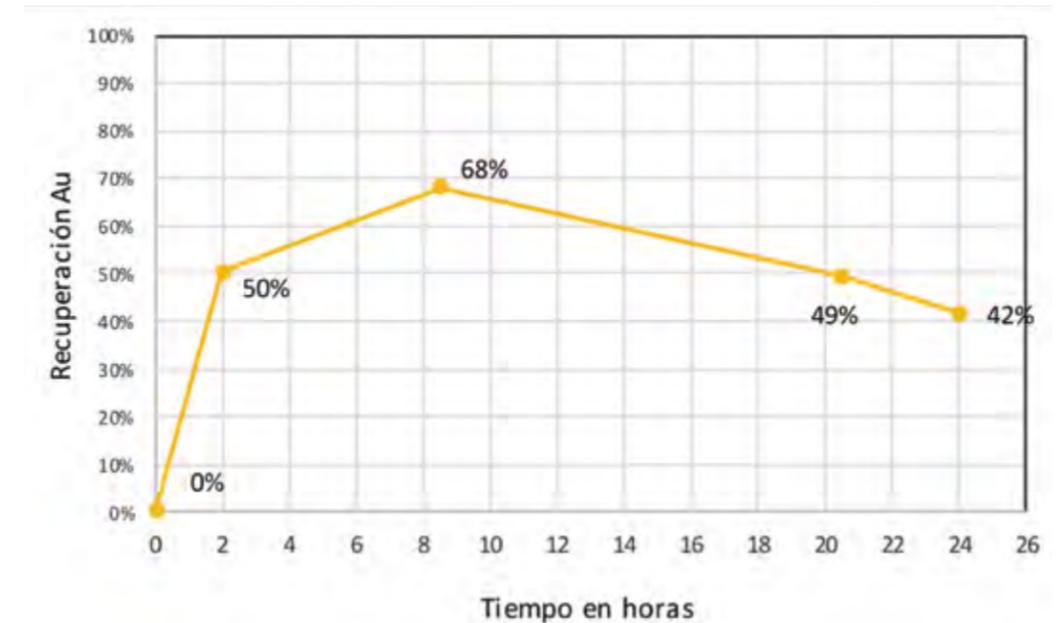
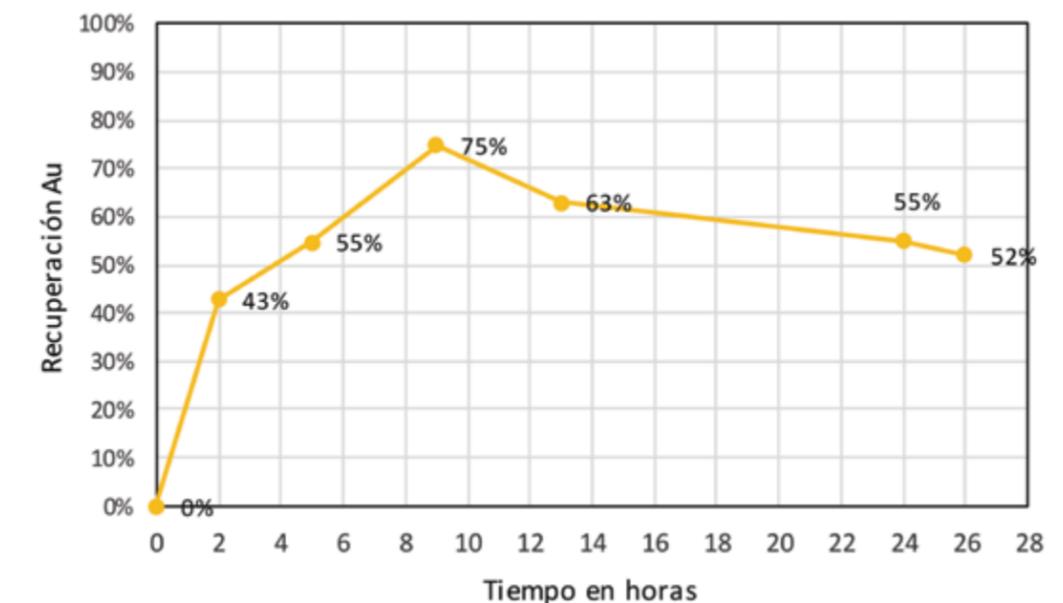


Figura 8.18. Lixiviación de oro por cianuración para las colas de batea planta Higuerón. Fuente: autores.



8.3.5. PLANTA LA PODEROSA

Concentración mesa Wilfley

Cabeza 1: Cabeza proceso La Poderosa
Molienda hasta d80 =300 micrómetros
Tiempo de concentración: 7 minutos
Agua de fluidización: 6.9 L/m

Figura 8.19. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza de la mina La Poderosa. Fuente: autores.

| IDENTIFICACIÓN | PESO (g) | % PESO | TENOR AU (g/t) | PESO AU (µg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Cabeza | 2399 | 100,0 | 18,3 | 43896,4 | | |
| Concentrado 1 | 222,3 | 9,27% | 144,6 | 32144,6 | 73,23% | 7,9 |
| Medios | 892,4 | 37,20% | 7,7 | 6871,5 | 15,65% | |
| Colas | 1284,3 | 53,53% | 3,8 | 4880,3 | 11,12% | |

Refinación en batea

Cabeza: Concentrados del ensayo de mesa Wilfley Poderosa
Molienda hasta d80 =300 micrómetros
Tiempo de concentración: 5 minutos

Figura 8.20. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina La Poderosa. Fuente: autores.

| IDENTIFICACIÓN | PESO (g) | % PESO | TENOR AU (g/t) | PESO AU (µg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Cabeza | 182 | 100,0 | 118,69 | 21602,7 | | |
| Concentrado | 15,1 | 8,30% | 796,51 | 12027,2 | 55,67% | 6,71 |
| Colas | 166,9 | 91,70% | 57,37 | 9575,5 | 44,33% | |

Concentración por flotación

Cabeza: Medios y colas del ensayo de mesa Wilfley planta La Poderosa
Molienda hasta d80 =75 micrómetros
Tiempo de acondicionamiento: 6 minutos
Tiempo de espumación: 3,5, 6 y 8 minutos

Figura 8.21. Resultados concentración por flotación de los medios y colas del ensayo de mesa de la planta La Poderosa. Fuente: autores.

| | TIPO | PESO (g) | % PESO | TENOR Au (g/t) | PESO Au (µg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|------------------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Colas de mesa | Cabeza | 231,81 | 100,0 | 4,91 | 1139,5 | | |
| | Concentrado 1. 3,5 min | 15,28 | 6,59% | 18,39 | 281,0 | 24,66% | 3,74 |
| | Concentrado 2. 6 min | 14,74 | 6,36% | 15,81 | 233,0 | 20,45% | 3,21 |
| | Concentrado 3. 8 min | 7,69 | 3,32% | 15,73 | 121,0 | 10,62% | 3,20 |
| | Colas | 194,1 | 83,73% | 2,60 | 504,5 | 44,27% | |
| Medios de mesa | Cabeza | 320,89 | 100,0 | 8,16 | 2618,0 | | |
| | Concentrado 1. 11 min | 37 | 11,53% | 56,44 | 2088,4 | 79,77% | 6,91 |
| | Colas | 283,89 | 88,47% | 1,87 | 529,6 | 20,23% | |

Cianuración

Figura 8.22. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta La Poderosa. 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 | 9.58 | 3.62 | 24 | 75 |
| Colas de batea | 5.36 | 4.57 | 24 | 75 |

Figura 8.23. Lixiviación de oro por cianuración los concentrados de flotación planta La Poderosa. Fuente: autores.

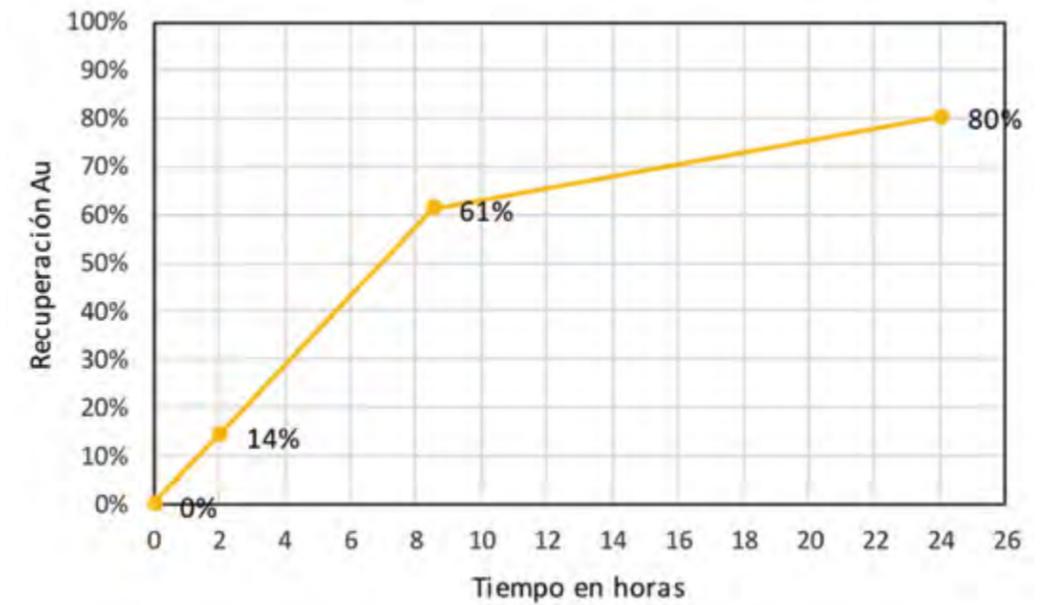
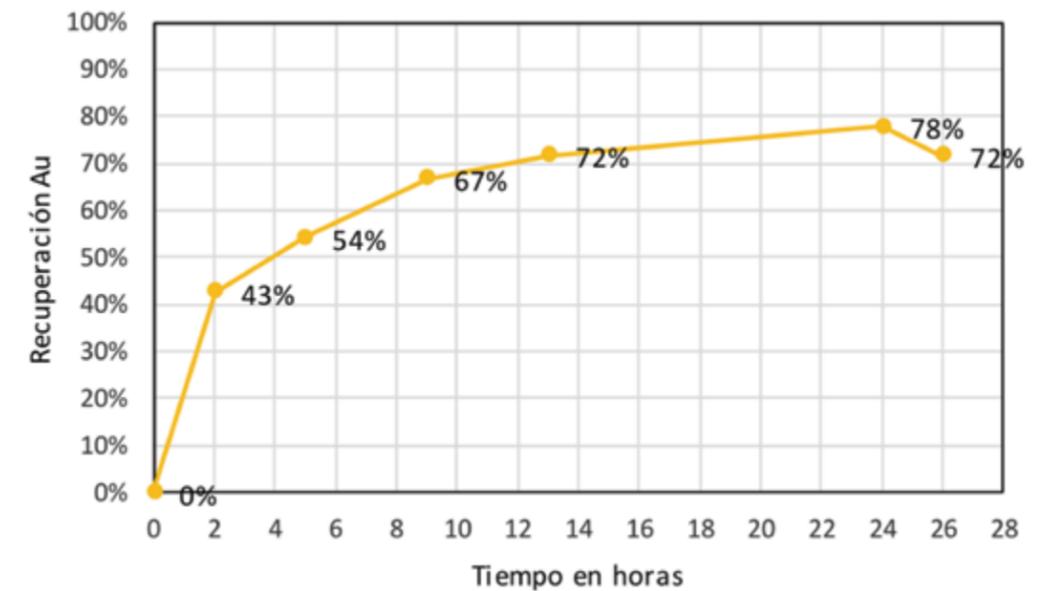


Figura 8.24. Lixiviación de oro por cianuración colas de batea planta La Poderosa. Fuente: autores.



8.3.5. PLANTA MONTERRUSIO

Concentración mesa Wilfley

Cabeza 1: M7397 Cabeza proceso Monterrusio
Molienda hasta d80 =600 micrómetros
Tiempo de concentración: 7 minutos
Agua de fluidización: 7,03 L/m

Figura 8.25. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza de la mina Monterrusio. Fuente: autores.

| IDENTIFICACIÓN | PESO (g) | % PESO | TENOR AU (g/t) | PESO AU (μg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Cabeza | 2636,3 | 100,0 | 105,73 | 278727,9 | | |
| Concentrado 1 | 475,40 | 18,03 | 460,00 | 218684,00 | 78,46 | 4,35 |
| Medios 1 | 1051,70 | 39,89 | 26,76 | 28143,49 | 10,10 | |
| Medios 2 | 673,20 | 25,54 | 19,44 | 13087,01 | 4,70 | |
| Colas | 436,00 | 16,54 | 43,15 | 18813,40 | 6,75 | |

Refinación en batea

Cabeza: M7938 Concentrados del ensayo de mesa Wilfley Monterrusio
Molienda hasta d80 =600 micrómetros
Tiempo de concentración: 5 minutos

Figura 8.26. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina Monterrusio. Fuente: autores.

| IDENTIFICACIÓN | PESO (g) | % PESO | TENOR AU (g/t) | PESO AU (μg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Cabeza | 433 | 100,0 | 438,35 | 189806,19 | | |
| Concentrado | 32,1 | 7 | 2861,85 | 91865,67 | 48 | 6,52 |
| Colas | 400,9 | 93 | 244,30 | 97940,52 | 52 | |

Concentración por flotación

Cabeza: Medios y colas del ensayo de mesa Wilfley planta Monterrusio
Molienda hasta d80 =106 micrómetros
Tiempo de acondicionamiento: 6 minutos
Tiempo de espumación: 8 minutos

Figura 8.27. Resultados concentración por flotación de los medios y colas del ensayo de mesa de la planta Monterrusio. Fuente: autores.

| | TIPO | PESO (g) | % PESO | TENOR Au (g/t) | PESO Au (μg) | % RECUPERACIÓN | RAZÓN DE CONCENTRACIÓN |
|----------------|----------------------|----------|--------|----------------|--------------|----------------|------------------------|
| Colas de mesa | Cabeza | 179,8 | 100,0 | 43,92 | 7896,45 | | |
| | Concentrado 1. 8 min | 34 | 18,91 | 84,95 | 2888,22 | 36,58 | 1,93 |
| | Colas | 145,8 | 81,09 | 34,35 | 5008,23 | 63,42 | |
| Medios de mesa | Cabeza | 493 | 100,0 | 24,21 | 11935,0 | | |
| | Concentrado 1. 8 min | 64 | 12,98 | 124,61 | 7975,33 | 66,82 | 5,14 |
| | Colas | 429 | 87,02 | 9,23 | 3959,67 | 33,18 | |

Figura 8.28. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta Monterrusio. 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 | 10.66 | 7.01 | 24 | 106 |
| Colas de batea | 5.13 | 5.20 | 24 | 75 |

Figura 8.29. Lixiviación de oro por cianuración los concentrados de flotación planta Monterrusio. Fuente: autores.

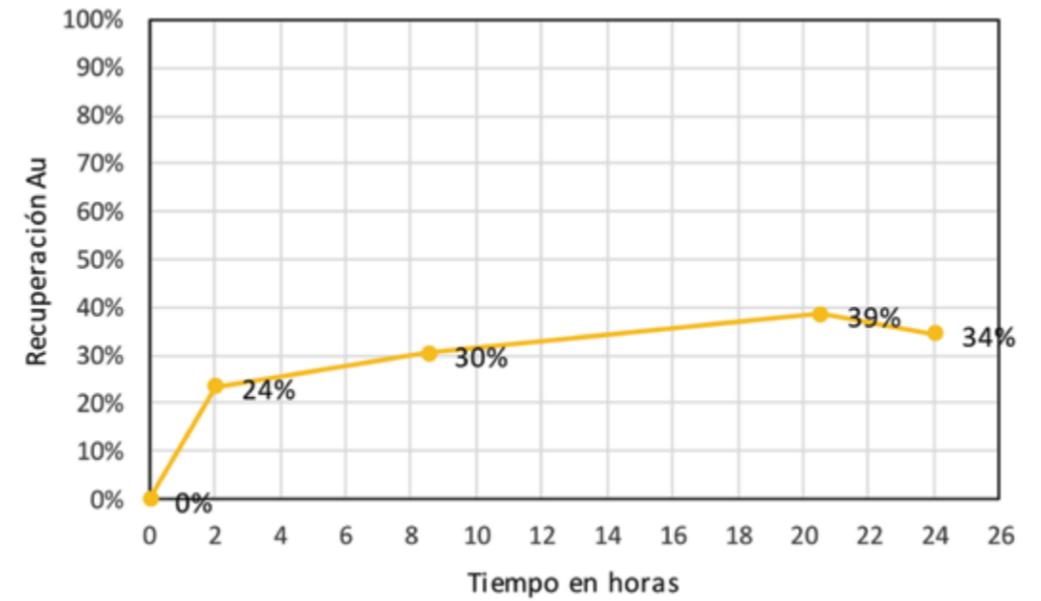
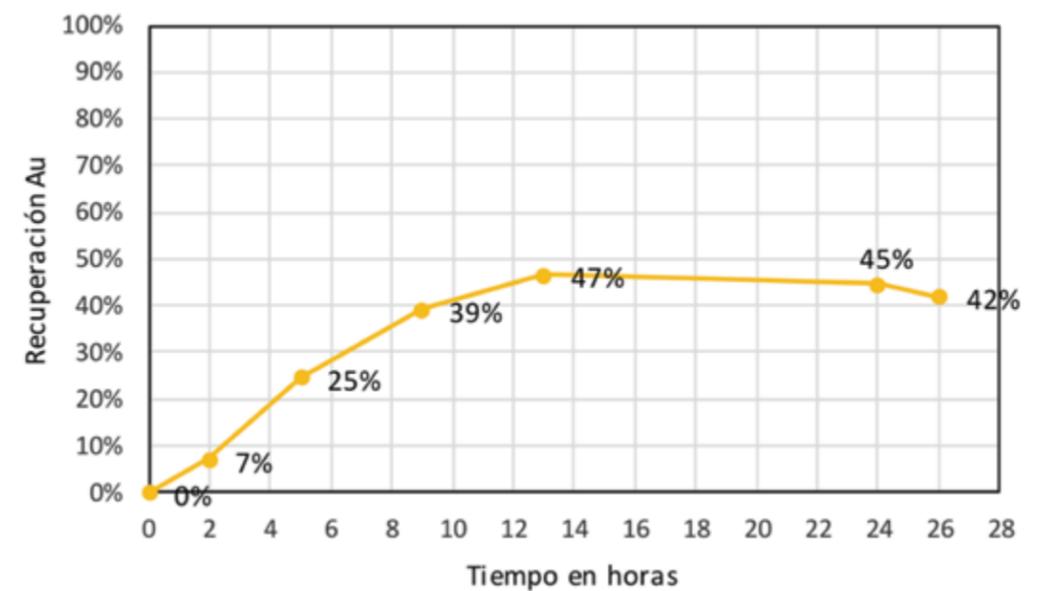


Figura 8.30. Lixiviación de oro por cianuración colas de batea planta Monterrusio. Fuente: autores.



8.4. PROCESO DE BENEFICIO SUGERIDO

Se sugieren dos procesos aplicables a las diferentes unidades geometalúrgicas encontradas en la zona para el aprovechamiento efectivo y ambientalmente sostenible del oro en los municipios de Bolívar, La Sierra y Almaguer.

8.4.1. PROCESO 1: INCLUYENDO CIANURACIÓN

La figura 8.31. describe el flujo propuesto de operaciones y procesos. Este diagrama incluye concentración gravimétrica y refinación de concentrados para fundir directamente, concentración por flotación y cianuración de concentrados de flotación, así como rechazos de refinación gravimétrica.

- Se establece un proceso de conminución en tres etapas (dos de trituración y una de molienda, con sus respectivas etapas de clasificación).
- Hay variaciones en cuanto al tamaño de partícula al que se deben moler los diferentes minerales (antes de ser concentrados gravimétricamente), según la zona. Por ejemplo, la liberación de los minerales metálicos de La Sierra se da a los 300 micrómetros, los de Almaguer a los 425 micrómetros, y los de Bolívar a los 600 micrómetros. A estos tamaños se espera una liberación de más del 80% de los sulfuros.
- Son menas de relativamente fácil liberación (no debe haber un elevado consumo energético en la molienda).
- La recuperación gravimétrica según la mineralogía de las menas debe recuperar entre un 70 y un 80% del oro.

La concentración por flotación es un proceso que puede recuperar el oro que no se recuperó en la concentración gravimétrica; sin embargo, este proceso debe aplicarse a los rechazos, después de haberlos sometido a una clasificación y remolienda para obtener un tamaño de partícula menor de 75 micrómetros, de acuerdo con los tamaños de los sulfuros sin liberar y del oro observado.

- En los diferentes sectores se encontró oro de muy pequeño tamaño (menor de 20 micrómetros), incluido en cuarzo y en sulfuros. Este oro es prácticamente irrecuperable con procesos y equipos convencionales. Se estima que este oro irrecuperable en la zona represente el 10%.
- Se plantea la cianuración para recuperar el oro proveniente de los concentrados de flotación y de las colas de refinación gravimétrica mediante un proceso de remolienda a un tamaño inferior a 75 micrómetros. Se sugiere la operación sabiendo que hay minerales carbonáceos que pueden interferir en el proceso de lixiviación del oro y bajar la recuperación de este proceso; se espera que este efecto no sea superior a un 25% del oro que ingresa a la operación. La lixiviación del oro según los tamaños se debe dar en tiempos inferiores a 24 horas.

8.4.2. PROCESO 2. PLANTA DE CONCENTRADOS AURÍFEROS

En la figura 8.32. se ilustra el segundo proceso de beneficio sugerido, con el que solo se trata de obtener el oro libre y de gran tamaño fundiendo concentrados refinados mediante procesos gravimétricos y flotando los rechazos de estos procesos para obtener un concentrado de flotación con una mayor concentración de sulfuros y oro, a tal punto que se puedan comercializar.

La obtención y comercialización de concentrados gravimétricos y de flotación es una alternativa a la posible baja recuperación de oro por cianuración con un proceso convencional.

Figura 8.31. Diagrama de beneficio sugerido, con cianuración. Fuente: autores.

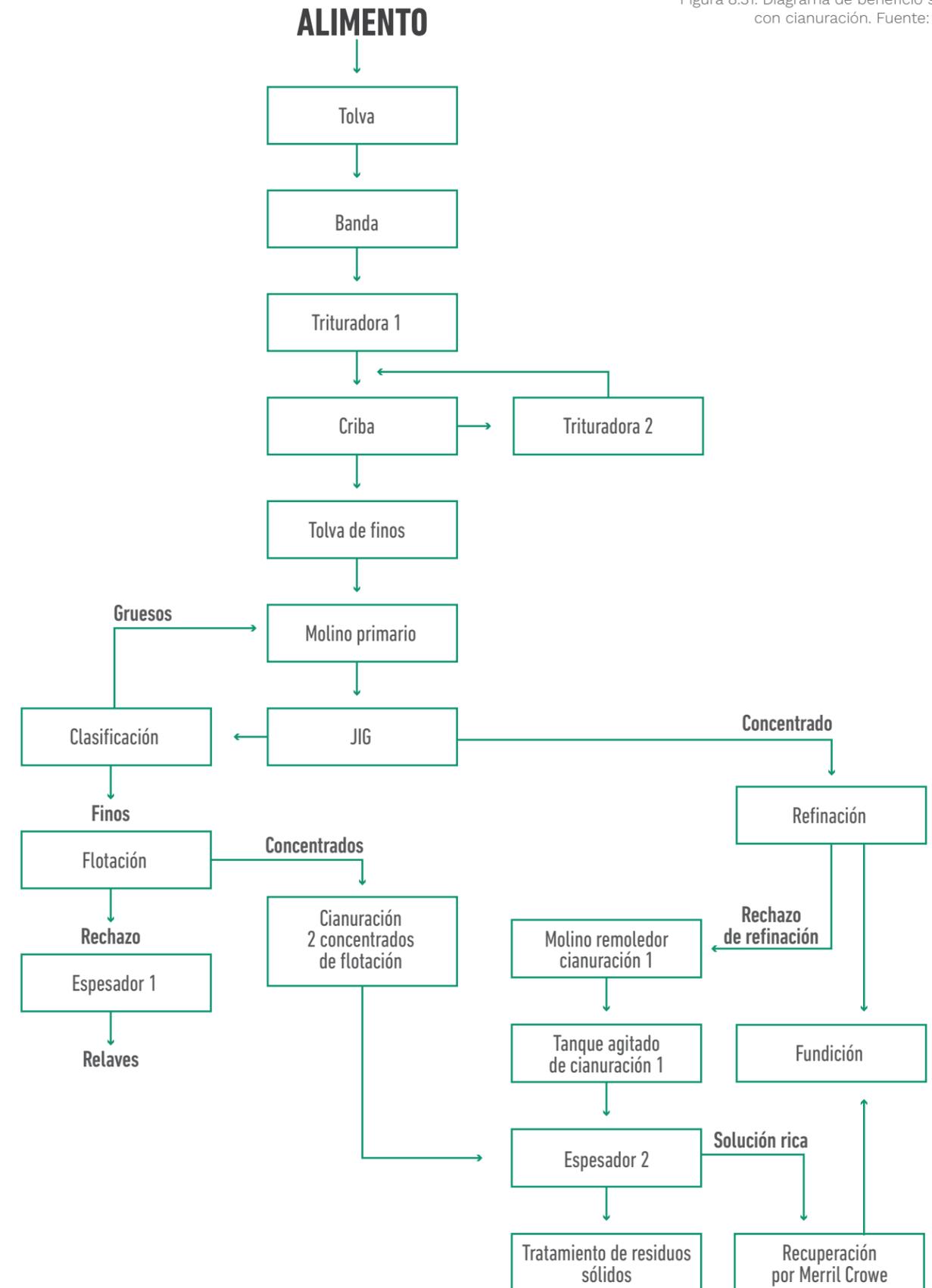
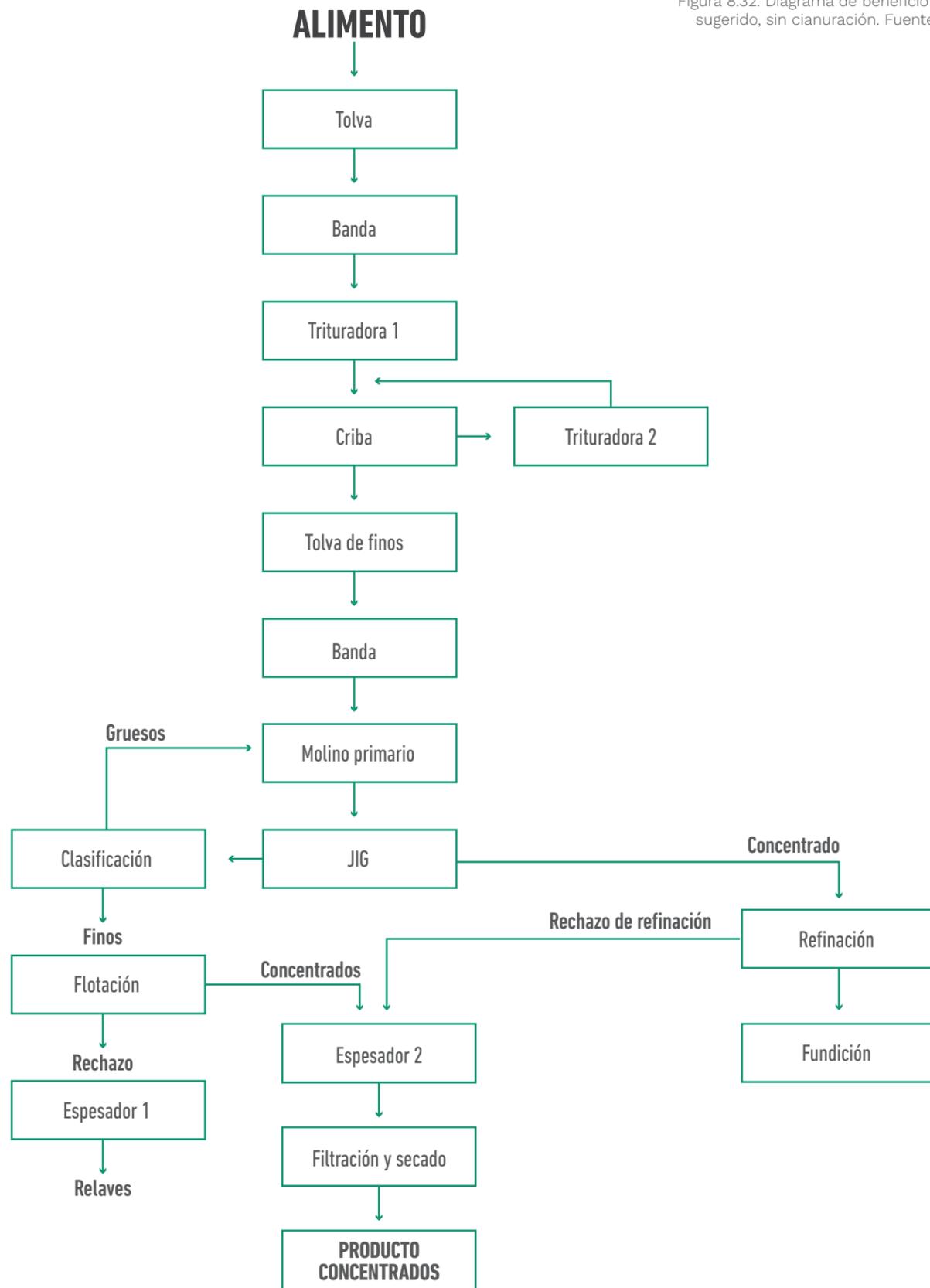


Figura 8.32. Diagrama de beneficio en planta sugerido, sin cianuración. Fuente: autores.



8.5. 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 8.33. Diagrama de balance de materia de proceso sugerido, con cianuración. Fuente: autores.

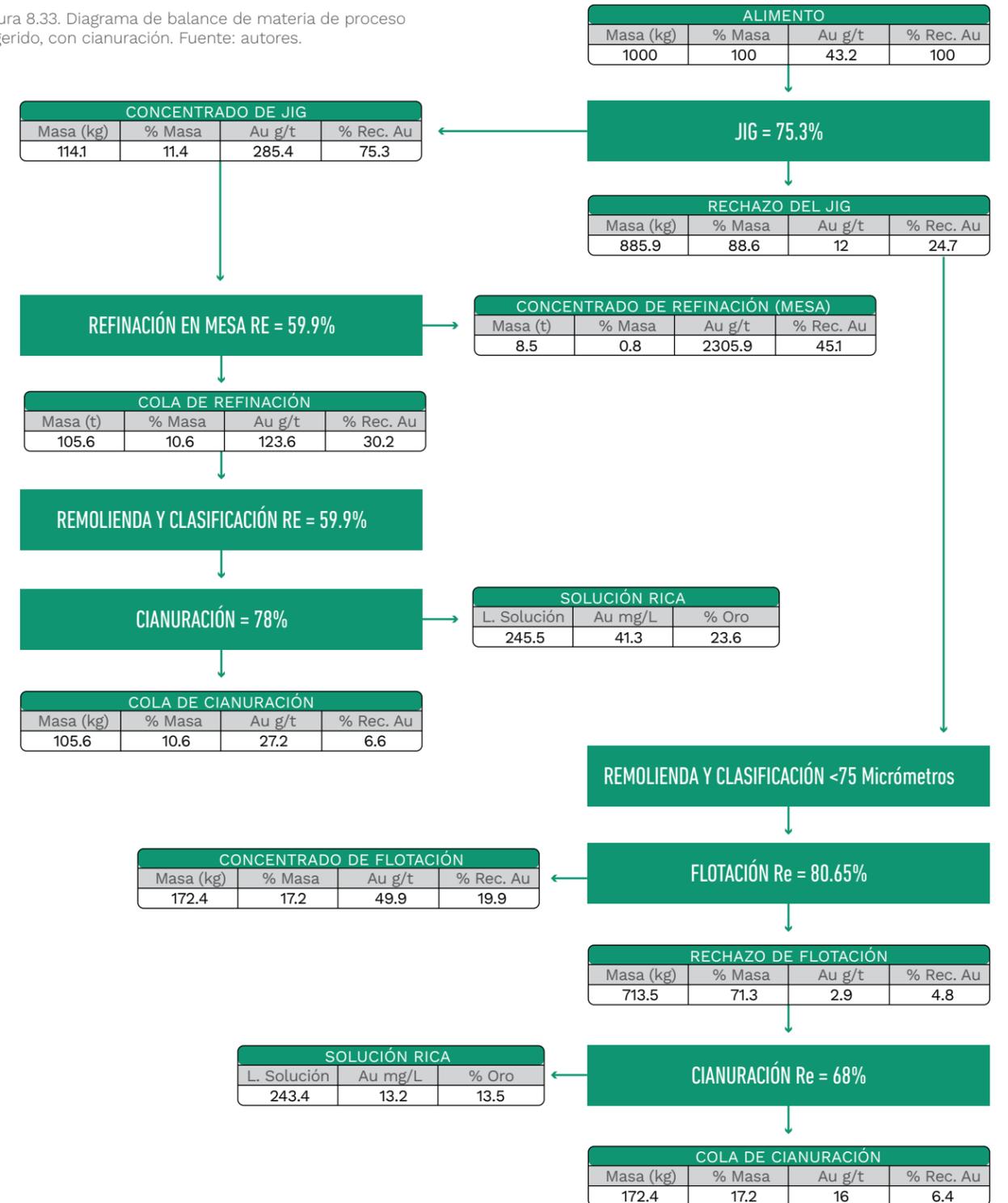
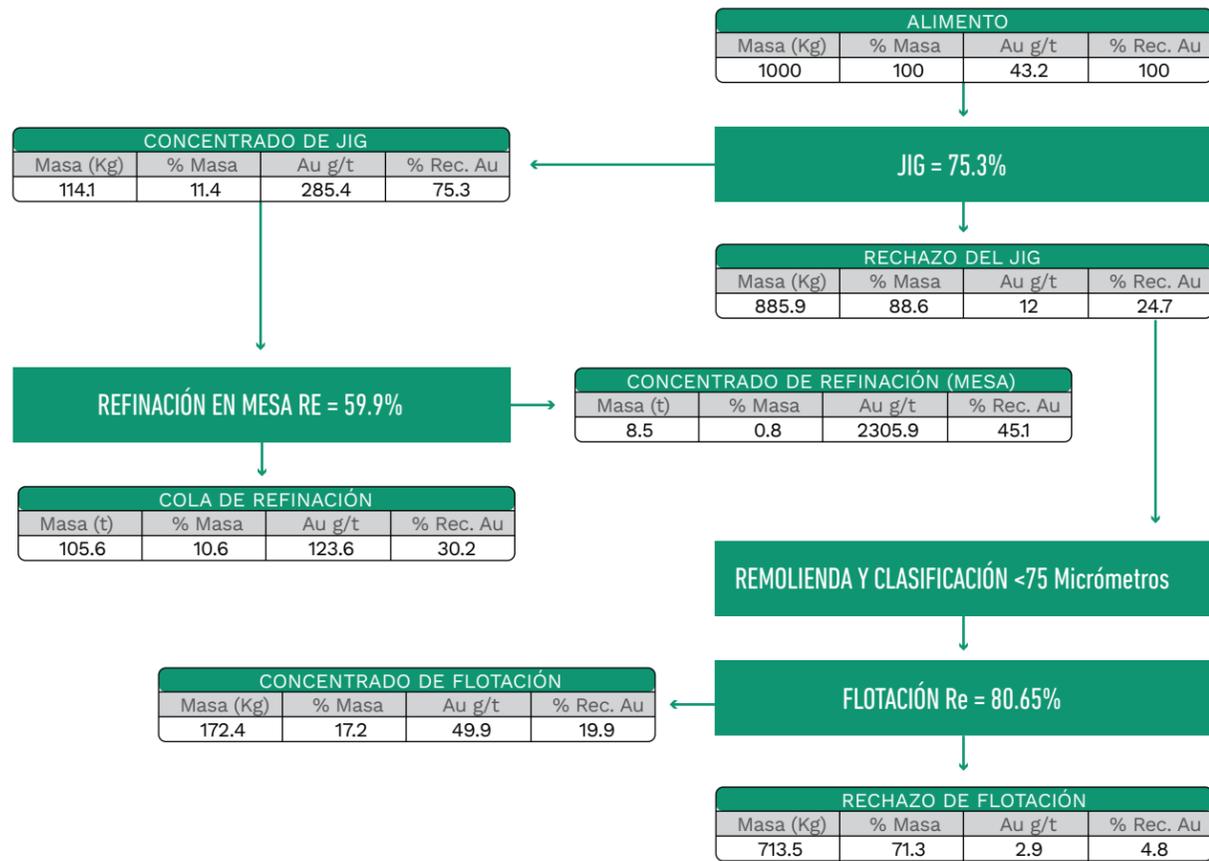


Figura 8.34. Diagrama de balance de materia de proceso sugerido, sin cianuración. Fuente: autores.



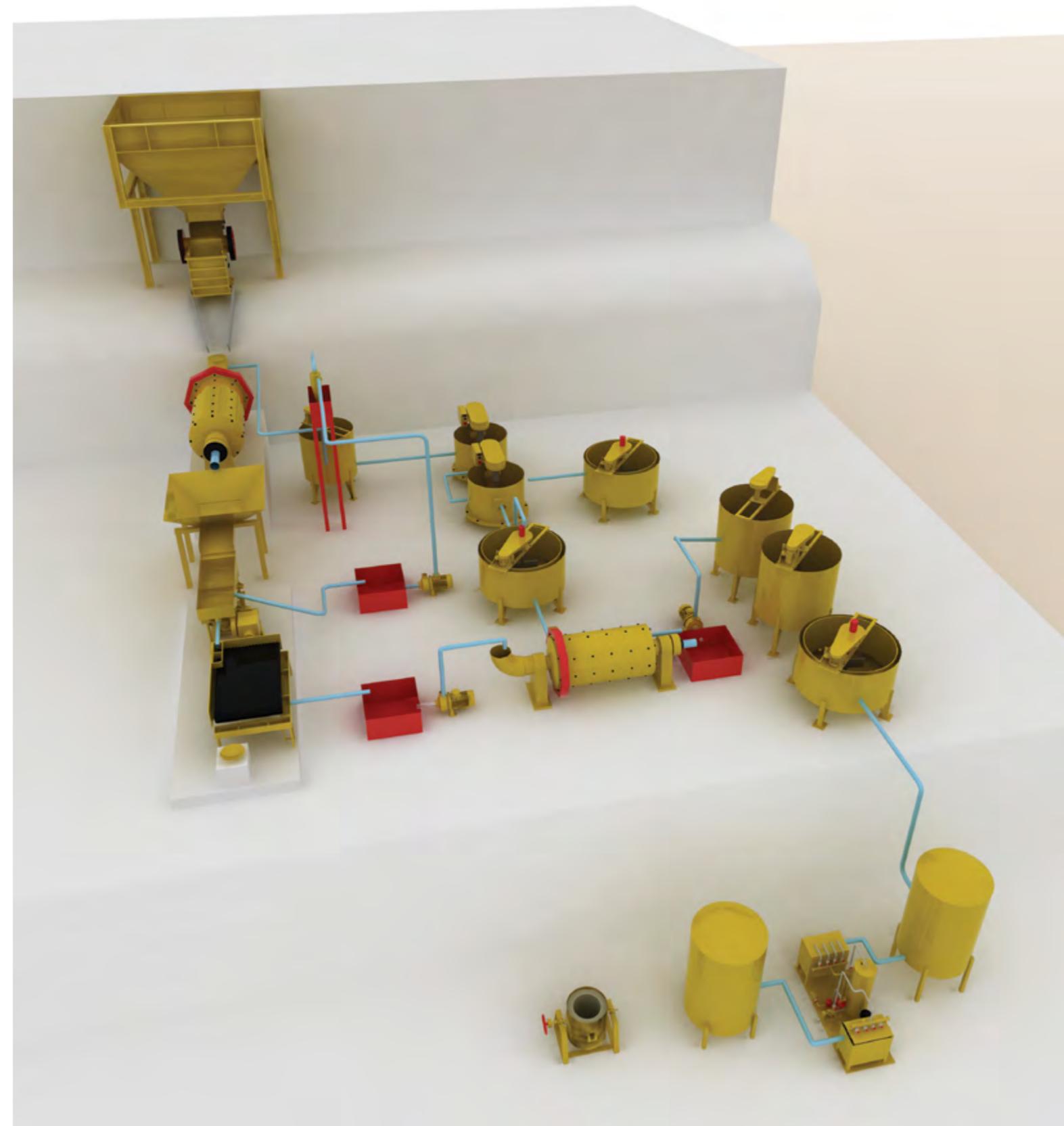
8.6. MONTAJE DE LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

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.

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.

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.

Fotografía 8.1. Montaje de la planta de beneficio propuesta para la zona de Mercaderes (Cauca). Fuente: autores.



8.7. 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 8.35. Diagrama de flujo de planta de beneficio sugerida, con cianuración. Fuente: autores.

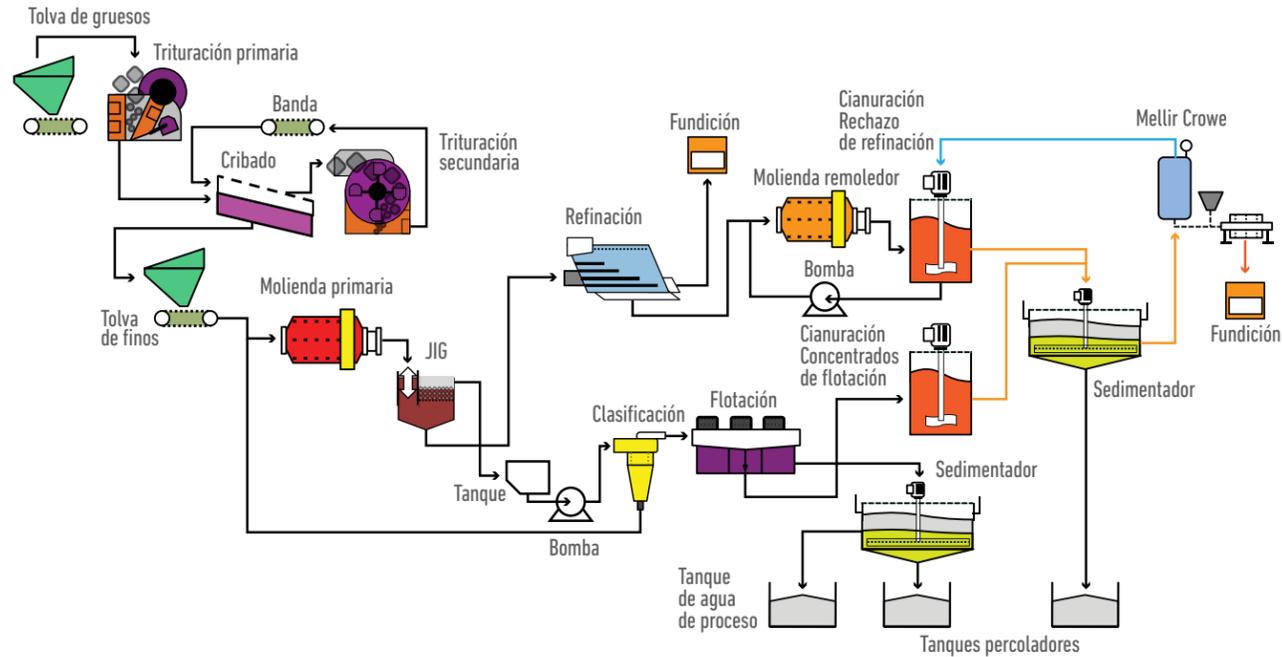
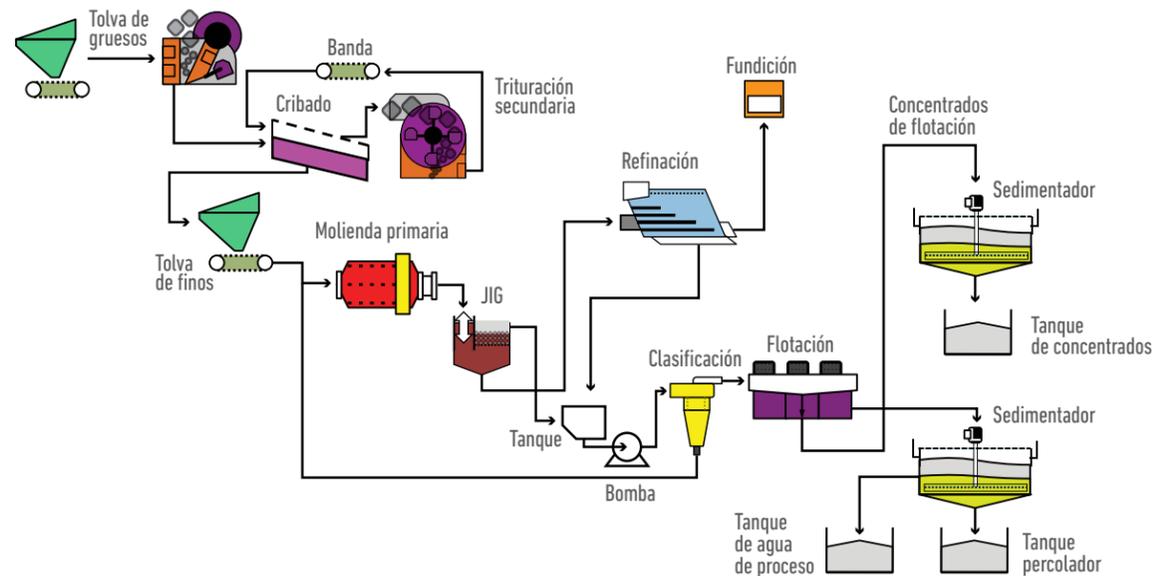


Figura 8.36. Diagrama de flujo de planta de beneficio sugerida, sin cianuración. Fuente: autores.



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 | |

8.8. CONCLUSIONES METALÚRGICAS ACERCA DE LAS OPERACIONES ACTUALES

- Si bien puede haber algunas partículas de oro de tamaño superior a los 200 µm, el tamaño de dichas partículas se presenta en su mayoría en el rango de 50 a 150 µm, de modo que pueden ser cianuradas sin que este proceso requiera tiempos prolongados. Desde este punto de vista, los concentrados de flotación y los rechazos de refinación gravimétrica pueden ir a cianuración, siempre y cuando se haya hecho previamente una adecuada molienda.
- La zona minera del Cauca en general, y las plantas de beneficio en particular, requieren de laboratorios para medir y controlar operativamente los procesos; los insuficientes instrumentos de medición y análisis les impiden a los mineros tener un control operativo y contable de sus operaciones.
- En la zona no se aplica el proceso de concentración por flotación ni lixiviación de oro por cianuración; tan solo se recupera el oro por medios gravimétricos.
- El circuito de reducción de tamaño que se acostumbra en la zona, consistente en trituradora de quijadas-molino primario, debe complementarse de tal manera que quede compuesto por dos etapas de trituración y una molienda, con clasificación de partículas, ya que, al no haber clasificación del producto de la molienda, muchas partículas de tamaño excesivo van a la concentración, lo que distorsiona la operación.
- Los montajes de las plantas de la zona en su mayoría están basados en trituradora de mandíbulas, barriles amalgamadores y canalones. Tan solo las plantas de beneficio de Mina Vieja, La Poderosa y Buriticá tienen otros equipos, como mesa concentradora, molino de bolas y molino chileno, respectivamente.

8.9. CONCLUSIONES A PARTIR DE LOS ENSAYOS METALÚRGICOS

8.9.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA SIERRA

- La mineralogía aportó información efectiva para predecir que en el material de estudio, el 73% del oro es propenso a concentrarse por gravimetría.
- Se plantea una preparación del material sometiéndolo a una reducción de tamaño secuencial, primero con la trituradora de mandíbulas, seguida por el pulverizador, que puede ser de martillo, para terminar con la molienda en molino de bolas.
- La molienda primaria puede llevarse a cabo tomando como clasificación de control un tamaño de grano de 600 micrómetros. Se sugiere que la molienda secundaria, a un tamaño de 75 micrómetros, se aplique sobre el rechazo de la concentración gravimétrica.
- La concentración por mesa Wilfley produjo una recuperación del 73,2% del oro de entrada, con una cantidad de masa equivalente al 9,3% de lo que entró originalmente. El material neto de rechazo de la operación contiene el 26,8% del oro distribuido en dos corrientes (medios y colas); este rechazo debe molerse a un d80 de por lo menos 75 micrómetros antes de someterlo al proceso de flotación.
- La concentración por flotación de los medios de mesa presenta comportamientos aceptables, de modo tal que se logra recuperar hasta un 80% del oro que ingresa. En la flotación de las colas de mesa solo se logra recuperar hasta un 55% del oro ingresado.

- Los concentrados de flotación se sometieron a cianuración. La recuperación de oro obtenida es del 80% en 24 horas de lixiviación. El gasto de cianuro de sodio durante la lixiviación de oro, para 24 horas de proceso, está entre 8 kilogramos de cianuro de sodio por tonelada de material lixiviado, y el gasto de cal durante la lixiviación de oro es de 4 kilogramos por tonelada de material lixiviado.
- El balance de masa propuesto para la zona se basa en la evidencia de que hay una recuperación del 90,6% del oro en los concentrados. Esto se obtiene sumando los concentrados de flotación, tanto de colas (6,2%), como de los medios de la mesa Wilfley (12,5%), más el concentrado de dicha mesa (73,2%).
- La recuperación final obtenida al recuperar el oro por gravimetría, más el oro obtenido por cianuración de los concentrados de flotación, más el recuperado del rechazo de refinación gravimétrica (cola de batea), es del 81%.
- Existe una refractariedad del mineral que impide mayores recuperaciones de oro en las lixivaciones, atribuida a materia orgánica de la matriz de roca. Esto se vio reflejado en un decaimiento de la disolución de oro en la solución de cianuro, del 87%, en la quinta hora de lixiviación, a un 67% a las 24 horas, cuando se lixivió un mineral proveniente de los medios de la concentración en mesa Wilfley.

La recuperación final obtenida al recuperar el oro por gravimetría, más el oro obtenido por cianuración de los concentrados de flotación, más el recuperado del rechazo de refinación gravimétrica (cola de batea), es del 81%.

8.9.2. CONCLUSIONES RELATIVAS A ALMAGUER

- La mineralogía aportó información efectiva para predecir que en el material analizado, el 75% del oro es propenso a concentrarse por gravimetría.
- La molienda primaria puede llevarse a cabo tomando como clasificación de control un tamaño de grano de 425 micrómetros. Se sugiere que la molienda secundaria, a un tamaño de 75 micrómetros, se aplique sobre el rechazo de la concentración gravimétrica.
- La concentración por mesa Wilfley produjo una recuperación del 75,3% del oro de entrada, con una cantidad de masa equivalente al 11,4% de lo que entró originalmente. El material neto de rechazo de la operación de concentración gravimétrica contiene el 24,7% del oro. Este rechazo debe molerse a un d80 de por lo menos de 75 micrómetros antes de someterlo al proceso de flotación.
- La concentración por flotación de los medios de mesa presenta comportamientos aceptables, de modo tal que se logra recuperar hasta un 80% del oro que ingresa. En la flotación de las colas de mesa solo se logra recuperar hasta un 64% del oro ingresado.
- Los concentrados de flotación se sometieron a cianuración. La recuperación de oro obtenida es del 68% en 24 horas de lixiviación. El gasto de cianuro de sodio durante la lixiviación de oro para 9 horas de proceso está entre 5 y 8 kilogramos de cianuro de sodio por tonelada de material lixiviado, y el gasto de cal durante la lixiviación de oro es de 2 kilogramos por tonelada de material lixiviado.
- El balance de masa propuesto para la zona se basa en la evidencia de que hay una recuperación del 94,2% del oro en los concentrados. Esto se obtiene sumando los concentrados de flotación tanto de co-

La recuperación final obtenida al recuperar el oro por gravimetría, más el oro obtenido por cianuración de los concentrados de flotación, más el recuperado del rechazo de refinación gravimétrica (cola de batea), es del 81,6%.

- las (2,1%), como de los medios de la mesa Wilfley (16,9%), más los concentrados de dicha mesa (75,3%).
- La recuperación final obtenida al recuperar el oro por gravimetría, más el oro obtenido por cianuración de los concentrados de flotación, más el recuperado del rechazo de refinación gravimétrica (cola de batea), es del 81,6%.
- Existe una refractariedad del mineral que impide mayores recuperaciones de oro en las lixiviaciones, atribuida a materia orgánica de la matriz de roca. Esto se vio reflejado en las recuperaciones de oro de los concentrados de flotación, en los que solo se alcanza un 68%, y en las colas de batea, en las que se alcanza un 75%, y en las que se observa un decaimiento de la disolución de oro en la solución de cianuro, en la novena hora de lixiviación, hasta de un 42% y un 52%, respectivamente, a las 24 horas.

8.9.3. CONCLUSIONES RELATIVAS A BOLÍVAR

- La mineralogía aportó información efectiva para predecir que en el material de estudio, el 78,5% del oro es propenso a concentrarse por gravimetría.
- La molienda primaria puede llevarse a cabo tomando como clasificación de control un tamaño de grano de 600 micrómetros.
- La concentración por flotación, tanto de los medios de mesa como de las colas, presenta comportamientos de recuperación bajos (hasta un 66% en los medios y 36% en las colas del oro que ingresa). Estas flotaciones se realizaron con partículas pasantes de 106 micrómetros. Para mejorar esta recuperación, el mineral debe ser remolido por debajo de los 75 micrómetros.
- Con respecto a los ensayos de cianuración, dieron recuperaciones de 48 y 39% en las colas de batea y en los concentrados de flotación, respectivamente, que representan el 19,6% del oro total procedente de la cianuración de las colas de batea, y el 4,8% del oro total procedente de los concentrados de flotación.
- El balance de masa propuesto para la zona se basa en la evidencia de que hay una recuperación del 90,9% del oro en los concentrados. Esto se obtiene sumando los concentrados de flotación tanto de colas (2,5%), como de los medios de la mesa Wilfley (9,9%), más los concentrados de dicha mesa (78,5%).
- La recuperación final obtenida al recuperar el oro por gravimetría, más el oro obtenido por cianuración de los concentrados de flotación, más el recuperado del rechazo de refinación gravimétrica (cola de batea), es del 62%.
- Existe una refractariedad del mineral que impide mayores recuperaciones del oro en las lixiviaciones, atribuida a materia orgánica de la matriz de roca. Esto se vio reflejado en las recuperaciones de oro de los concentrados de flotación, en los que solo se alcanza un 39%, y en las colas de batea, en las que se alcanza un 48%, y en las que se observa un decaimiento de la disolución de oro en la solución de cianuro, después de 13 horas de lixiviación, de hasta un 42%.

La recuperación final obtenida al recuperar el oro por gravimetría, más el oro obtenido por cianuración de los concentrados de flotación, más el recuperado del rechazo de refinación gravimétrica (cola de batea), es del 62%.

8.10. CONCLUSIONES ACERCA DE LA SUSTITUCIÓN DE LA AMALGAMACIÓN

- Según los resultados obtenidos, la extracción por refinación gravimétrica y fundición, así como la extracción química con cianuro de sodio, pueden sustituir la extracción de oro con mercurio, con grandes ventajas técnicas, productivas, ambientales y económicas.
- Hay oro grueso susceptible de ser concentrado gravimétricamente para ser extraído por fundición directa de un superconcentrado.
- Hay oro fino susceptible de ser concentrado por flotación espumante, para extraerlo por cianuración.
- Los concentrados de oro generados en la concentración gravimétrica y en la flotación pueden representar menos del 30% de la masa del material inicial que entra al proceso.
- De acuerdo con la mineralogía de la muestra de la mina, el oro podría extraerse por cianuración, siempre y cuando se hayan efectuado previamente procedimientos adecuados de concentración, tanto en mesa como por flotación y molienda fina, con lo cual podría reemplazarse el proceso de amalgamación. La cianuración no tuvo los mejores resultados de recuperación de oro, debido a los efectos de inhibición por materia carbonosa.
- Las partículas de oro están, en su mayor parte, en un rango de 50 a 150 μm , de modo que los tiempos de cianuración no son muy prolongados.

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.

Panorámica al sur este del municipio de La Sierra (Cauca). Fotografía tomada por William Pulido, 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 Mesa (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 MERCADERES (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 Mercaderes), 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 Mercaderes (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.

Figura 9.1. Variables de operación futura de la mina y planta de beneficio. Fuente: autores.

| VARIABLE | VALOR |
|---|-----------|
| Tiempo de trabajo en mina | 8 h/día |
| Volumen de material de mina extraído | 25 t/día |
| Volumen de material estéril extraído | 15 t/día |
| Volumen de material mineral extraído | 10 t/día |
| Capacidad de procesamiento de la planta | 1,25 t/h |
| Tiempo de funcionamiento de la planta | 8 h/día |
| Volumen de procesamiento | 10 t/día |
| Turnos por día | 1 por día |
| Días de operación al mes | 26 días |
| Volumen de procesamiento | 260 t/mes |
| Tenor por tonelada de material de mina | 43,2 g/t |
| Porcentaje total de recuperación de oro | 82,2 % |
| Recuperación total de oro | 35,51 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 | Peso 26 kg | 2 |
| Picador neumático | Peso 8,5 kg | 2 |
| Rotomartillo eléctrico | 599 x 134 x 287 mm | 2 |
| Ventiladores axiales | 90 m ³ /minuto | 2 |
| Extractor, ventilador axial | 45 m ³ /minuto | 1 |
| Compresor portátil diésel | Unidad compresora 5 años (10.000 horas) | 1 |
| Planta eléctrica diésel doméstica | 9,6 kW | 1 |
| Bomba autocebante | 1,5 HP | 2 |
| Bomba sumergible | 1,5 HP | 1 |
| Malacate con motor | Motor de 3 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 4 m 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 m x 4 m x 2 m | 1 |
| | Caja de pulpa | 0,80 m x 0,80 m x 1 m | 1 |
| | Bomba de sólidos | 2,5" x 2" | 2 |
| | Hidrociclón 1 | 4" | 2 |
| | Molino de bolas primario | 4" x 5" - 1,20 x 1,50 m | 1 |
| CONCENTRACIÓN | Jig | 8 x 12 dúplex | 1 |
| | Mesa de concentración secundaria | 1,50 x 2,50 m | 1 |
| | Tanque acondicionador | 1 m ³ | 1 |
| | Celdas de flotación circulares | 1,2 m | 2 |
| | Tanque espesador | 2,5 m | 2 |
| CIANURACIÓN | Tanques de cianuración agitada | D = 3 m, H = 3 m | 2 |
| | Tanque para precipitación de oro en cinc | D = 3 m, H = 3,5 m | 1 |
| | Precipitación, sistema Merrill Crowe | 5 a 10 m ³ /hora | 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 de lámina | Capacidad de 30 m ³ | 1 |
| | Tanques auxiliares de propileno | 1000 L | 1 |
| | Tanques auxiliares de lámina para neutralización | D = 3 m, H = 3,5 m | 1 |
| | Tanque reactor | D = 3 m, H = 3 m | 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 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

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 |
|---|----------------|
| PARTES Y ACCESORIOS | |
| 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*690 | 2 unidades |
| Broca helicoidal SDS Max Diager 1. 174*36 (32*920 mm) | 2 unidades |
| Barrena integral Sandvik de 3" (0,80) cm | 1 unidad |
| Barrena integral Sandvik de 3" (1,20) cm | 1 unidad |
| Mangas de ventilador | 26 metros |
| HERRAMIENTAS Y SUMINISTROS | |
| Carretas | 1 unidad |
| Palas | 4 unidades |
| Picas | 4 unidades |
| Manguera para aire comprimido 1" | 26 metros |
| Manguera para agua 1" | 26 unidades |
| Tablon de pino x 2 mts | 30 tablon |
| Palancas de madera* | 26 unidades |
| Cable encauchetado 3 x 10" | 60 metros |
| Toma eléctrica | 2 unidades |
| Clavos de acero de 3" | 1 caja x 25 |
| Tubo PVC 3" | 24 metros |
| Clavija industrial | 2 unidades |
| Bombillos de litio | 8 unidades |
| Ducto plastico para ventilador | 75 metros |
| Aceite mobil ALMO 527 | 2 unidades |
| COMBUSTIBLE Y EXPLOSIVOS | |
| Diésel | 208 galones |
| Indugel Plus AP (26 mm *x 250 mm) caja de 25 kilogramos (*) | 400 kg |
| Anfo Rezar, bulto de 25 kilogramos (*) | 300 kg |
| Detonador común n.º 8 (caja de 100 unidades) (*) | 2.500 unidades |
| Mecha lenta de seguridad (caja por de 500 metros) (*) | 4.500 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.

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 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 | TURNOS 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 |
| Total | | 10 | | | | 9.251.480 |

(*) 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 (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.

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 |
| Total: | \$ 227.401 | |

(*) 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 |
| Total: | \$ 74.530 | |

(*) 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 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%

• **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.

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 |
| TOTAL | \$ 201.960 | |

(*) 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 portalámpara | 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.

• **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

Costo de mantenimiento (\$) = valor comercial total (\$) × 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.

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 |
| Total: | | | | | | 84 | 2,184 |

Fórmula para calcular el costo mensual de energía eléctrica

Costo de la energía eléctrica (\$) = consumo energía (kWh/mes) × tarifa kW (\$)

La figura 9.9. contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

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.

• **Depreciación maquinaria y equipo para la fase de extracción**

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 equipo

Costo depreciación (\$) = valor comercial del equipo (\$) / tiempo de vida útil (meses)

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 8.7.), 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 | 312 |
| | Revestimientos trituradora primaria | kg | 1,2 | 312 |
| | Revestimientos trituradora secundaria | kg | 1,2 | 312 |
| | Revestimientos de molino primario | kg | 1,2 | 312 |
| | Revestimientos de molino secundario | kg | 1,2 | 312 |
| | FLOTACIÓN | Aero 5160 (contratipo A31) | kg | 0,045 |
| | Aero 8255 (contratipo A31) | kg | 0,045 | 12 |
| | Amil xantato de potasio | kg | 0,085 | 22 |
| | Espumante aero-froth65 | kg | 0,04 | 10 |
| | Sulfato de cobre | kg | 0,08 | 20 |
| CIANURACIÓN | Cianuro de sodio (NaCN) | kg | 5 | 1.300 |
| | Cal (CaO) | kg | 5 | 1.300 |
| | Hidróxido de sodio (potasa) | kg | 0,0391 | 10 |
| | Acetato de plomo | kg | 0,003 | 1 |
| | Polvo de zinc | kg | 0,024 | 6 |
| | Celite (diactive 12) | kg | 0,013 | 3 |
| FUNCIONAMIENTO | Bórax pentahidratado | kg | 0,044 | 11 |
| | Carbonato de sodio | kg | 0,008 | 2 |
| | Sílice - Cuarzo | kg | 0,025 | 7 |
| MANEJO AMBIENTAL | Floculante | kg | 0,004 | 1 |
| | Ácido sulfúrico | kg | 0,300 | 78 |
| | Peróxido de hidrógeno | kg | 0,269 | 70 |

(*) La dosificación por tonelada fue determinada por el Equipo Técnico. (**) La cantidad consumida mes se estimó para 260 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta. (***) La cantidad consumida mensualmente se estimó para 260 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta.

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 | 2 | 1 | 828.116 | 97.032 | 1.850.296 |
| Molienda | Operario | 2 | 1 | 828.116 | 97.032 | 1.850.296 |
| Flotación | Operario | 1 | 1 | 828.116 | 97.032 | 925.148 |
| Cianuración | Operario | 2 | 1 | 828.116 | 97.032 | 1.850.296 |
| Fundición | Operario | 1 | 1 | 828.116 | 97.032 | 925.148 |
| General | Supervisor | 1 | 1 | 828.116 | 97.032 | 925.148 |
| Total | | 9 | | | | 8.326.332 |

(*) 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

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 |
| Total: | \$ 227.401 | |

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en la Ley 100 de 1993.

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 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 |
| Total: | \$ 74.530 | |

(*) 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 |
| TOTAL | \$ 201.960 | |

(*) 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

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 |
| | Ensayos al fuego | Concentrado de mesa | 26 |
| CONCENTRACIÓN | Ensayos al fuego | Superconcentrado | 8 |
| | Ensayos al fuego | Fundido | 8 |
| | Ensayos al fuego | Cola de cianuración | 26 |
| FUNDICIÓN | 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 |
| | Absorción atómica | Ambientales | 4 |
| MANEJO AMBIENTAL | Absorción atómica | Ambientales | 4 |

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 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.

Figura 9.15. Consumo de energía por equipos de la fase de beneficio. Fuente: autores.

| | EQUIPO | CANTIDAD | POTENCIA DE MOTOR HP | POTENCIA DE MOTOR 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 |
| | Molino de bolas secundario | 30 | 22,50 | 20,25 | 1 | 8 | 162 | 4.212 |
| | Bomba de sólidos | 7,5 | 5,63 | 4,50 | 2 | 8 | 72 | 1.872 |
| | Total trituración y molienda | | | | | | | 15.538 |
| CONCENTRACIÓN | Mesa de concentración secundaria | 2 | 1,5 | 1,20 | 1 | 8 | 9,6 | 250 |
| | Celdas circulares de flotación circulares | 12 | 9 | 7,20 | 2 | 8 | 115,2 | 2.995 |
| | Tanque espesador | 2 | 1,5 | 1,20 | 2 | 8 | 19,2 | 499 |
| | Tanque acondicionador | 5 | 3,75 | 3,00 | 1 | 8 | 24 | 624 |
| | Total concentración | | | | | | | 4.368 |
| CIANURACIÓN | Tanque de agitación (Lixiviación) | 12 | 9 | 7,20 | 2 | 24 | 345,6 | 8.986 |
| | Precipitación, sistema Merrill Crowe | 14 | 10,5 | 8,40 | 1 | 8 | 67,2 | 1.747 |
| | Compresor | 45 | 33,75 | 27,00 | 1 | 24 | 648 | 16.848 |
| | Total cianuración | | | | | | | 27.581 |
| MANEJO AMBIENTAL | Tanque de agitado para neutralización | 12 | 9 | 7,20 | 1 | 16 | 115,2 | 2.995 |
| | Bombas para recirculación de aguas y soluciones | 5 | 3,75 | 3,00 | 3 | 16 | 144 | 3.744 |
| | Total manejo ambiental | | | | | | | 6.739 |
| | | | | | | | Total | 54.226 |

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 (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 (\$)

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 costo e ingreso unitario, es decir, el valor por cada gramo de oro, se calcula dividiendo el valor de los costos totales del mes entre el número de gramos recuperados, y viceversa.

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 | 43,2 | 100 | 43,2 |
| 1 | 43,2 | 82,20 % | 35,51 |

(*) Con la implementación de la propuesta tecnológica se puede alcanzar mínimo un 82,2% de recuperación de oro por tonelada. (**) Para la zona minera de Mercaderes (unidad geometalúrgica 1) se determinó que el tenor es de 43,2 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

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.

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 la Constitución Política de Colombia de 1991, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación económica.

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

$$\text{TIR} = (-) \frac{- \text{Inversión Inicial (\$)} + \sum_{t=1}^5 \text{FNE (\$)}}{\sum_{t=1}^5 (\text{TD}_t(\%) \times \text{FNE}_t(\$))}$$

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 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 MERCADERES, 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 |
|--|----------------------|--------------------------------------|
| Activos fijos | | |
| Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de extracción | 142.724.021 | 11% |
| Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de beneficio | 990.467.465 | 77% |
| Instalaciones eléctricas e hidráulicas | 150.823.999 | 12% |
| Total activos fijos | 1.284.015.485 | |

(*) 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 (*) |
|-------------------------------------|-------------------|----------------|
| Mantenimiento | 1.070.430 | 4.117 |
| Depreciación de maquinaria y equipo | 1.189.367 | 4.574 |
| Energía eléctrica | 1.255.850 | 4.830 |
| Partes y accesorios | 2.830.052 | 10.885 |
| Herramientas y suministros | 3.502.966 | 13.473 |
| Elementos de seguridad industrial | 4.458.271 | 17.147 |
| Mano de obra | 14.290.352 | 54.963 |
| Combustible y explosivos | 27.116.376 | 104.294 |
| Total | 55.713.664 | 214.283 |

(*) El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 209.709/t.

Figura 9.19. Estructura de los costos de la fase de extracción de oro, operación futura en mina. Fuente: autores.

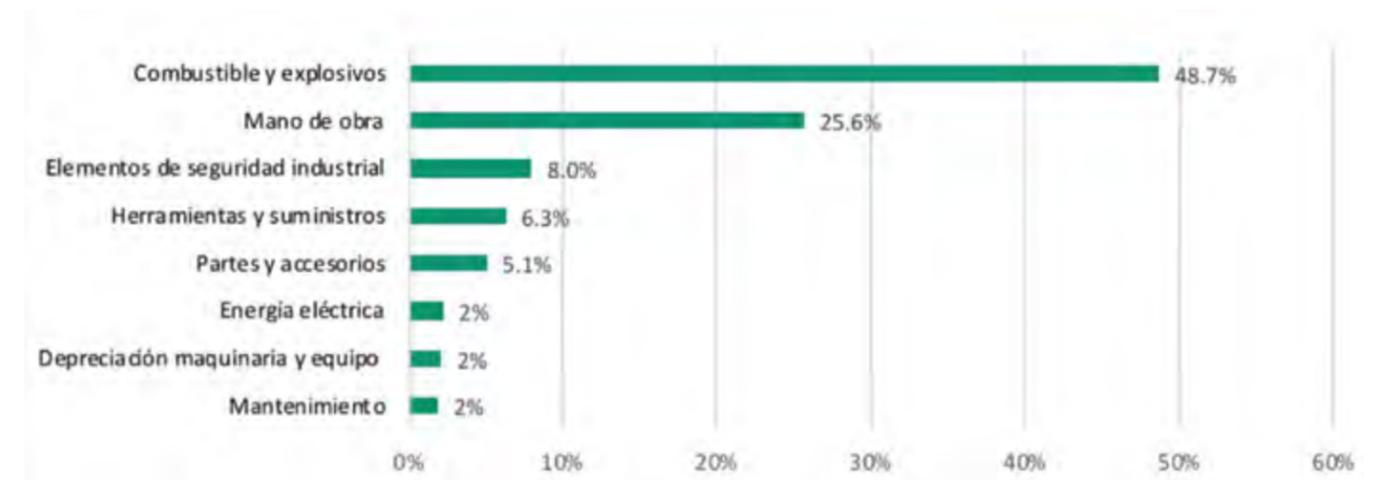


Figura 9.20. Costos de operación total (extracción + beneficio) por mes. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COP (\$) |
|---|--------------------|
| COSTOS DIRECTOS | |
| Materia prima, costo de extracción | 54.524.297 |
| Insumos | 26.348.431 |
| Mano de obra | 12.861.350 |
| Mantenimiento | 7.428.506 |
| Análisis y pruebas de laboratorio | 22.300.000 |
| Servicios públicos | 31.391.862 |
| Depreciación | 9.443.262 |
| Total costos directos | 164.297.709 |
| COSTOS INDIRECTOS | |
| Costos indirectos de fabricación (CIF) | 16.429.771 |
| Total costos directos + indirectos | 180.727.480 |

Figura 9.21. Estructura de los costos de la fase de beneficio, operación futura en planta. Fuente: autores.

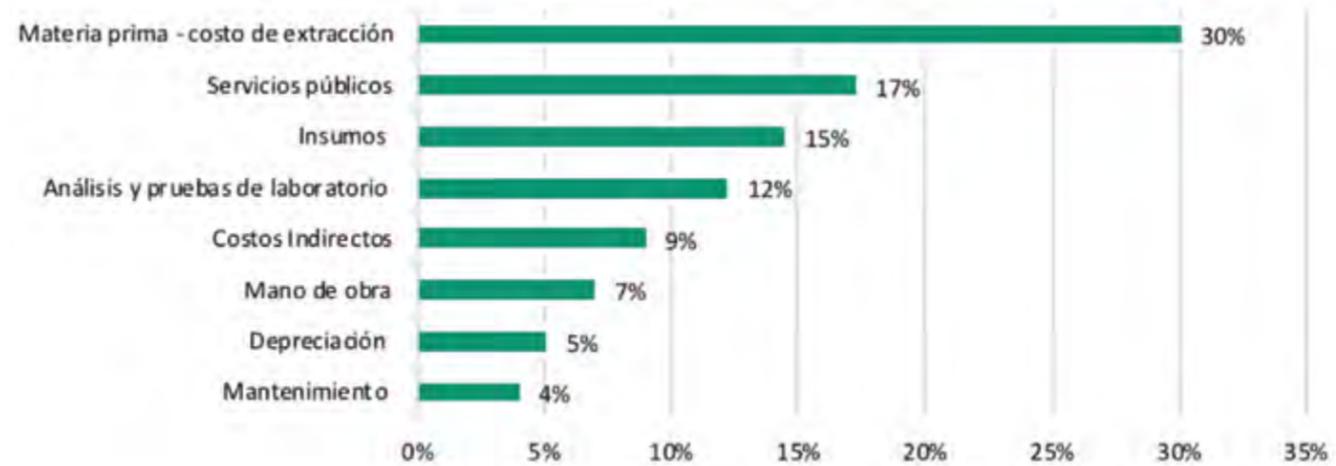


Figura 9.22. Ingresos de operación futura, por mes. Fuente: autores.

| 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 | 43,2 | 45,1 | 19,48 | 5.066 | 119.815 | 606.938.698 |
| Cianuración | 43,2 | 37,1 | 16,0272 | 4.167 | 119.815 | 499.277.732 |
| Total | | 82,2 | 35,51 | 9.233 | | 1.106.216.430 |

(*) 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 (-) | -1,284,015,485 | | | | | |
| TOTAL INVERSIÓN INICIAL | -1,284,015,485 | | | | | |
| (2) INGRESOS GRAVABLES (+) | | | | | | |
| Ingresos Operacionales | | 13,274,597,157 | 13,672,835,072 | 14,083,020,124 | 14,505,510,728 | 14,940,676,050 |
| TOTAL INGRESOS GRAVABLES | | 13,274,597,157 | 13,672,835,072 | 14,083,020,124 | 14,505,510,728 | 14,940,676,050 |
| (3) EGRESOS DEDUCIBLES (-) | | | | | | |
| Costos Operacionales | | 2,055,410,610 | 2,090,749,010 | 2,127,145,911 | 2,164,634,392 | 2,203,248,606 |
| Regalías (4%) | | 424,787,109 | 437,530,722 | 450,656,644 | 464,176,343 | 478,101,634 |
| Depreciación | | 113,319,149 | 113,319,149 | 113,319,149 | 113,319,149 | 113,319,149 |
| TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES | | 2,593,516,867 | 2,641,598,881 | 2,691,121,704 | 2,742,129,884 | 2,794,669,388 |
| (4) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS | | 10,681,080,290 | 11,031,236,191 | 11,391,898,420 | 11,763,380,844 | 12,146,006,661 |
| (5) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL | | 80.5% | 80.7% | 80.9% | 81.1% | 81.3% |
| (6) IMPUESTOS (-) | | | | | | |
| IMPUESTO DE RENTA (33%) (-) | | 3,524,756,496 | 3,640,307,943 | 3,759,326,479 | 3,881,915,679 | 4,008,182,198 |
| TOTAL IMPUESTOS | | 3,524,756,496 | 3,640,307,943 | 3,759,326,479 | 3,881,915,679 | 4,008,182,198 |
| (7) UTILIDAD NETA | | 7,156,323,794 | 7,390,928,248 | 7,632,571,942 | 7,881,465,165 | 8,137,824,463 |
| (8) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA | | 53.9% | 54.1% | 54.2% | 54.3% | 54.5% |
| (9) DEPRECIACIÓN (+) | | 113,319,149 | 113,319,149 | 113,319,149 | 113,319,149 | 113,319,149 |
| (10) FLUJO NETO DE EFECTIVO | -1,284,015,485 | 7,269,642,943 | 7,504,247,396 | 7,745,891,090 | 7,994,784,314 | 8,251,143,612 |

9.3.1. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES DE EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE MERCADERES, RUTA METALÚRGICA 1

El VPN del proyecto de la zona minera de Mercaderes correspondiente a la ruta metalúrgica 1, a una tasa de descuento del 30%, es de COP 17.295.537.025.

El VPN del proyecto de la zona minera de Mercaderes correspondiente a la ruta metalúrgica 1, a una tasa de descuento del 40% COP 14.175.410.530.

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 30 y 40% 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 30 y 40% es de 6,58 y 6,57, 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.

Figura 9.24. Indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona, ruta metalúrgica 1. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | TASA DE DESCUENTO 30 % | TASA DE DESCUENTO 40 % |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Valor presente neto (VPN) | \$17.295.537.025 | \$14.175.410.530 |
| Tasa interna de retorno (TIR) | 569 % | 569 % |
| Relación beneficio/costo (RB/C) | 6,58 | 6,57 |

9.4. ESTUDIO FINANCIERO DE LA OPERACIÓN ACTUAL VS. LA OPERACIÓN FUTURA EN LA ZONA MINERA DE MERCADERES, 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 Mercaderes, 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 mercaderes

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 | 4 h/día |
| Volumen de material de mina extraído | 1,13 t/día |
| Volumen de material estéril extraído | 0,68 t/día |
| Volumen de material mineral extraído | 0,45 t/día |
| Capacidad de procesamiento | 0,1125 t/h |
| Funcionamiento de la planta | 4 h/día |
| Volumen de procesamiento | 0,45 t/día |
| Turnos por día | 1 por día |
| Días de operación al mes | 20 días |
| Volumen de procesamiento | 9 t/mes |
| Tenor por tonelada de material de mina | 43,2 g/t |
| Porcentaje total de recuperación de oro | 65,0 % |
| Recuperación total de oro | 28,08 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 MERCADERES

Figura 9.26. Costos actuales de la fase de extracción, por mes. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COP \$ | COP \$/t (*) |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| Mantenimiento | 454.207 | 50.467 |
| Depreciación maquinaria y equipo | 504.675 | 56.075 |
| Partes y accesorios | 656.533 | 72.948 |
| Energía eléctrica | 690.027 | 76.670 |
| Herramientas y suministros | 809.897 | 89.989 |
| Combustible y explosivos | 1.058.520 | 117.613 |
| Elementos de seguridad industrial | 1.245.409 | 138.379 |
| Mano de obra | 8.574.211 | 952.690 |
| Total | 13.993.479 | 1.554.831 |

(*) El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 1.498.756/t.

Figura 9.27. Estructura de costos actuales de la fase de extracción de oro. Fuente: autores.

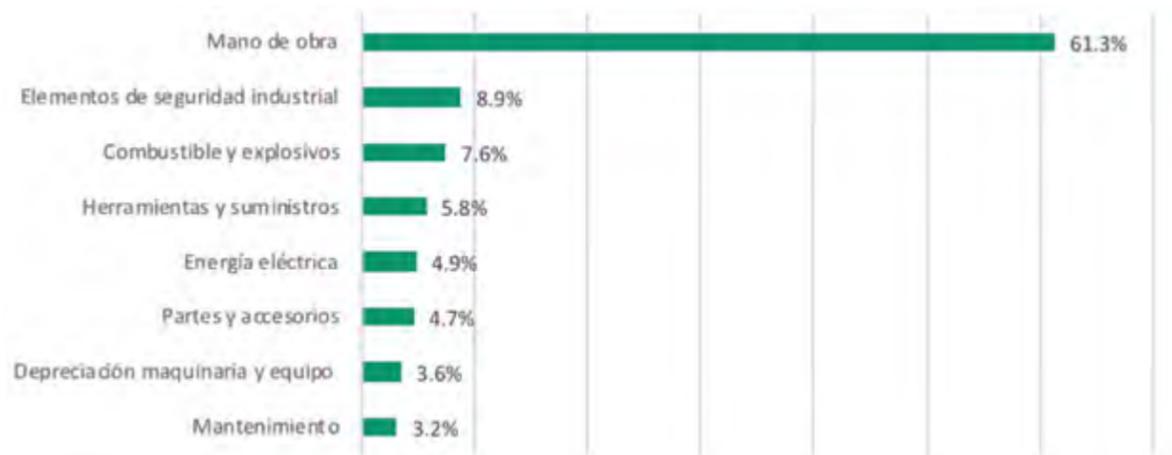


Figura 9.28. Costos de la operación actual (extracción + beneficio), por mes. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COP (\$) |
|---|-------------------|
| COSTOS DIRECTOS | |
| Materia Prima | 13.488.804 |
| Insumos | 2.055.033 |
| Mano de Obra | 4.287.106 |
| Mantenimiento | 450.300 |
| Servicios Públicos | 2.056.682 |
| Depreciación de Maquinaria y Equipo | 1.450.333 |
| Total costos directos | 23.788.258 |
| COSTOS INDIRECTOS | |
| Costos indirectos de fabricación (CIF) | 2.378.826 |
| Total costos directos + indirectos | 26.167.084 |

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 (\$) |
|--------------|-------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------|
| Amalgamación | 43,2 | 65 | 28,08 | 253 | 119.815 | 30.279.647 |

(*) 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 | 363,355,762 | 374,256,434 | 385,484,127 | 397,048,651 | 408,960,111 |
| TOTAL INGRESOS GRAVABLES | 363,355,762 | 374,256,434 | 385,484,127 | 397,048,651 | 408,960,111 |
| (2) EGRESOS DEDUCIBLES (-) | | | | | |
| Costos Operacionales | 296,601,009 | 304,748,696 | 313,158,025 | 321,837,640 | 330,796,483 |
| Depreciación | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 |
| Regalías | 11,627,384 | 11,976,206 | 12,335,492 | 12,705,557 | 13,086,724 |
| TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES | 325,632,394 | 334,128,902 | 342,897,517 | 351,947,197 | 361,287,207 |
| (3) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS | 37,723,368 | 40,127,532 | 42,586,611 | 45,101,454 | 47,672,904 |
| (4) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL | 10.38% | 10.72% | 11.05% | 11.36% | 11.66% |
| (5) IMPUESTOS (-) | | | | | |
| IMPUESTO DE RENTA (33%) (-) | 12,448,711 | 13,242,086 | 14,053,582 | 14,883,480 | 15,732,058 |
| TOTAL IMPUESTOS | 12,448,711 | 13,242,086 | 14,053,582 | 14,883,480 | 15,732,058 |
| (6) UTILIDAD NETA | 25,274,656 | 26,885,447 | 28,533,029 | 30,217,974 | 31,940,846 |
| (7) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA | 6.96% | 7.18% | 7.40% | 7.61% | 7.81% |
| (8) DEPRECIACIÓN (+) | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 |
| (9) FLUJO NETO DE EFECTIVO | 42,678,656 | 44,289,447 | 45,937,029 | 47,621,974 | 49,344,846 |

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) | 65 % | 82,2 % |
| Cantidad de oro recuperado por tonelada | 28,08 gr | 35,51 gr |
| Costo de producción unitario por gramo de oro | COP 103.542 | COP 19.575 |
| Costo de producción unitario por onza troy de oro | USD 1.074 | USD 203 |
| Utilidad antes de impuestos por gramo de oro | COP 12.439 | COP 96.406 |
| Utilidad antes de impuestos por onza troy de oro | USD 129,0 | USD 1.000 |
| Margen de utilidad operacional (promedio 5 años) | 11,0 % | 80,9% |
| Utilidad después de impuestos por gramo de oro | COP 8.334 | COP 64.592 |
| Utilidad después de impuestos por onza troy de oro | USD 86,4 | USD 670 |
| Margen de utilidad neta (promedio 5 años) | 7,4% | 54,2% |
| Indicador de productividad (producto/insumo) | 1,16 | 6,12 |

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 MERCADERES, 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 428%, al pasar de una razón producto/insumo total de 1,16, 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 6,12 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 103.542, mientras que se espera que, con la operación futura, el costo unitario del gramo de oro sea de COP 19.575. Este resultado indica una reducción efectiva de los costos unitarios de 81%.

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 65%

a 82,2%) resulta en un aumento del margen de utilidad neta proyectada para los cinco años evaluados, al pasar de 7,4%, en la actualidad, a 54,2%, 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 Mercaderes, el costo unitario de producir 1 g de oro es de COP 103.542, mientras que la implementación de la ruta metalúrgica 1 reduce este costo a COP 19.575.

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 675%.

9.5. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE MERCADERES

- En el estudio financiero de la operación actual de la planta se utilizó como referencia un porcentaje de recuperación de oro de 65% por cada tonelada de mineral procesado, obtenido en el proceso de concentración gravimétrica y por medio de amalgamación, de acuerdo con la información colectada en campo por el equipo técnico.
- Teniendo en cuenta que el tenor de la zona minera de Mercaderes es de 42,3 gramos por tonelada, y que la operación actual permite una recuperación promedio del 65%, en el estudio financiero se estimó una recuperación de 28,08 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 1.498.756/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 elementos de seguridad industrial, cada uno con una participación sobre los costos totales de 61,3 y 8,9%, 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 52 y 16%, respectivamente.
- Se estableció que la planta de beneficio tiene un consumo de agua por cada tonelada de mineral procesado de aproximadamente 0,53 m³.
- 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 4.764 kW/mes, lo que equivale a un costo promedio de energía eléctrica mensual de COP 2.739.408.
- El costo unitario aproximado, teniendo en cuenta los parámetros de la operación actual definidos para la planta, es de COP 103.542 por cada gramo de oro y de USD 1.074 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 12.439/g de oro y de USD 129/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 11,0%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- La ganancia unitaria (después de pagar impuestos) aproximada es de COP 8.334/g de oro y de USD 86,4/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 7,4%, 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 MERCADERES, 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 3.120 toneladas de mineral, lo cual implica un funcionamiento de la planta de 26 días al mes y un procesamiento de 10 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 82,2%. Este porcentaje es mayor que la recuperación promedio que se obtiene en la planta en las condiciones actuales.
- Teniendo en cuenta que el tenor del material de cabeza promedio que se procesa en la planta es de 42,3 gramos, y que la implementación de la ruta metalúrgica 1 en la operación futura permite una recuperación mínima aproximada de 82,2%, se espera una recuperación de 35,51 gramos por cada tonelada de mineral beneficiada.
- Se definió un esquema conservador, en el cual se obtiene una recuperación de oro equivalente al 82,2% por cada tonelada de material mineral procesado. Sin embargo, estos rendimientos pueden ser superiores al 90%.
- 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 1.284.015.485.
- 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 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 combustible, y la mano de obra, cada uno con una participación sobre los costos totales de 48,7 y 25,6%, 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 energía eléctrica, cada uno con una participación sobre los costos totales de 30 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 56.410 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 19.575 por cada gramo de oro, y de USD 203 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 96.406/g de oro y de USD 1.000/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 80,9%, 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 64.592/g de oro y de USD 670/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 54,2%, 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 Mercaderes, 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 30 y 40% anuales.
- El período de recuperación de la inversión en adecuaciones, con las tasas de interés de oportunidad del 30 y 40% anuales, es inferior a un año.

9.7. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO EN LA ZONA MINERA DE MERCADERES, 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 Mercaderes), 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 mercaderes, 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 mercaderes, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

| VARIABLE | VALOR |
|---|-----------|
| Tiempo de trabajo en mina | 8 h/día |
| Volumen de material de mina extraído | 25 t/día |
| Volumen de material estéril extraído | 15 t/día |
| Volumen de material mineral extraído | 10 t/día |
| Capacidad de procesamiento de la planta | 1,25 t/h |
| Tiempo de funcionamiento de la planta | 8 h/día |
| Volumen de procesamiento | 10 t/día |
| Turnos por día | 1 por día |
| Días de operación al mes | 26 días |
| Volumen de procesamiento | 260 t/mes |
| Tenor por tonelada de material de mina | 43,2 g/t |
| Porcentaje total de recuperación de oro | 45,1 % |
| Recuperación total de oro | 19,48 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 | Peso 26 kg | 2 |
| Picador neumático | Peso 8,5 kg | 2 |
| Rotomartillo eléctrico | 599 x 134 x 287 mm | 2 |
| Ventiladores axiales | 90 m ³ /minuto | 2 |
| Extractor, ventilador axial | 45 m ³ /minuto | 1 |
| Compresor portátil diésel | Unidad compresora 5 años (10.000 horas) | 1 |
| Planta eléctrica diésel doméstica | 9.6 kW | 1 |
| Bomba autocebante | 1,5 HP | 2 |
| Bomba sumergible | 1,5 HP | 1 |
| Malacate con motor | Motor de 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 m x 4m 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 m x 4m x 2 m | 1 |
| | Molino de bolas primario | 4" x 5" - -1,20 x 1,50 m | 1 |
| | Caja de pulpa | 0,80m x 0,80m x 1 m | 1 |
| | Bomba de sólidos | 2,5" x 2" | 1 |
| | Hidrociclón 2 | 4" | 2 |
| CONCENTRACIÓN | Jig | 8 x 12 dúplex | 1 |
| | Mesa de concentración secundaria | 1,50 x 2,50 m | 1 |
| | Tanque acondicionador | 1 m ³ | 1 |
| | Celdas de flotación circulares | 1,2 m | 2 |
| | Tanque espesador | 2,5 m | 2 |
| FUNDICIÓN | Horno con crisol | Capacidad de 15 kg | 1 |
| MANEJO AMBIENTAL | Bomba para soluciones de 2" x 1,5" de alta (bombas para recirculación) | 5 HP | 2 |
| | Bomba para soluciones de 2" x 1,5" de baja | 2 HP | 2 |
| | Bomba sumergible | 2 HP | 2 |
| | Tanque en lámina | Capacidad de 30 m ³ | 1 |
| | Tanques auxiliares en de propileno | 1.000 L | 1 |
| | Tanque auxiliares en de lámina para neutralización | D = 3 m, H = 3,5 m | 1 |
| | Tanque reactor | D = 3 m, H = 3 m | 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.

Figura 9.36. Insumos que se utilizan en las operaciones de extracción del material de mina. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | CANTIDAD |
|---|----------------|
| PARTES Y ACCESORIOS | |
| 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*690 | 2 unidades |
| Broca helicoidal SDS Max Diager 1. 174*36 (32*920 mm) | 2 unidades |
| Barrena integral Sandvik de 3" (0,80) cm | 1 unidad |
| Barrena integral Sandvik de 3" (1,20) cm | 1 unidad |
| Mangas de ventilador | 26 metros |
| HERRAMIENTAS Y SUMINISTROS | |
| Carretas | 1 unidad |
| Palas | 4 unidades |
| Picas | 4 unidades |
| Manguera para aire comprimido 1" | 26 metros |
| Manguera para agua 1" | 26 unidades |
| Tablon de pino x 2 mts | 30 tablones |
| Palancas de madera* | 26 unidades |
| Cable encauchetado 3 x 10" | 60 metros |
| Toma eléctrica | 2 unidades |
| Clavos de acero de 3" | 1 caja x 25 |
| Tubo PVC 3" | 24 metros |
| Clavija industrial | 2 unidades |
| Bombillos de litio | 8 unidades |
| Ducto plastico para ventilador | 75 metros |
| Aceite mobil ALMO 527 | 2 unidades |
| COMBUSTIBLE Y EXPLOSIVOS | |
| Diésel | 208 galones |
| Indugel Plus AP (26 mm *x 250 mm) caja de 25 kilogramos (*) | 400 kg |
| Anfo Rezar, bulto de 25 kilogramos (*) | 300 kg |
| Detonador común n.º 8 (caja de 100 unidades) (*) | 2.500 unidades |
| Mecha lenta de seguridad (caja por de 500 metros) (*) | 4.500 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.

• **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 solicitud 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 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 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 |
| Total | | 10 | | | | 9.251.480 |

(*) 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.

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

$$\text{Provisión (\$/mes)} = \text{salario total (\$)} \times \% \text{ de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)}$$

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

$$\text{Provisión pago de intereses de cesantías (\$/mes)} = \text{cesantías (\$)} \times 12\%$$

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.

• 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.

• 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.

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 |
| Total: | \$ 227.401 | |

(*) 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 |
| Total: | \$ 74.530 | |

(*) 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 |
| TOTAL | \$ 201.960 | |

(*) 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 portallámpara | 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 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 (\$)

- **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 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)

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 |
| Total: | | | | | | 84 | 2,184 |

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 8.8), 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.

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).

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.

Figura 9.41. Insumos para la fase de beneficio. Fuente: autores.

| PROCESOS | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CONSUMO / TONELADA* | CONSUMO MENSUAL** |
|------------------------|---------------------------------------|--------|---------------------|-------------------|
| TRITURACIÓN Y MOLIENDA | Cuerpos molidores | kg | 1,2 | 312 |
| | Revestimientos trituradora primaria | kg | 1,2 | 312 |
| | Revestimientos trituradora secundaria | kg | 1,2 | 312 |
| | Revestimientos de molino primario | kg | 1,2 | 312 |
| | Revestimientos de molino secundario | kg | 1,2 | 312 |
| FLOTACIÓN | Aero 5160 (contratipo A31) | kg | 0,045 | 12 |
| | Aero 8255 (contratipo A31) | kg | 0,045 | 12 |
| | Amil xantato de potasio | kg | 0,085 | 22 |
| | Espumante aero-froth65 | kg | 0,04 | 10 |
| | Sulfato de cobre | kg | 0,08 | 20 |
| FUNCIONACIÓN | Bórax pentahidratado | kg | 0,044 | 11 |
| | Carbonato de sodio | kg | 0,008 | 2 |
| | Sílice - Cuarzo | kg | 0,025 | 7 |
| MANEJO AMBIENTAL | Floculante | kg | 0,004 | 1 |
| | Ácido sulfúrico | kg | 0,300 | 78 |
| | Peróxido de hidrógeno | kg | 0,269 | 70 |

(*) La dosificación por tonelada fue determinada por el Equipo Técnico. (**) La cantidad consumida mes se estimó para 260 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta. (***) La cantidad consumida mensualmente se estimó para 260 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta.

• 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 | Operario | 2 | 1 | 828.116 | 97.032 | 1.850.296 |
| Molienda | Operario | 2 | 1 | 828.116 | 97.032 | 1.850.296 |
| Flotación | Operario | 1 | 1 | 828.116 | 97.032 | 925.148 |
| Fundición | Operario | 1 | 1 | 828.116 | 97.032 | 925.148 |
| General | Supervisor | 1 | 1 | 828.116 | 97.032 | 925.148 |
| Total | | 7 | | | | 6.476.036 |

(*) 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

$$\text{Aportes a seguridad social (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aportes (EPS, pensión, ARL)}$$

• 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
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

$$\text{Provisión (\$/mes)} = \text{salario total (\$)} \times \% \text{ de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)}$$

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.

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

$$\text{Provisión para el pago intereses de cesantías (\$/mes)} = \text{cesantías (\$)} \times 12\%$$

• 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

$$\text{Costo de mantenimiento (\$)} = \text{valor comercial total (\$)} \times 0,75\%$$

• 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 9.43. 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 |
| Total: | \$ 227.401 | |

(*) 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 |
| Total: | \$ 74.530 | |

(*) 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 |
| TOTAL | \$ 201.960 | |

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en Ley 1607 de 2012.

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 9.44. 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 | Cola de flotación | 26 |
| | Ensayos al fuego | Concentrado de mesa | 26 |
| | Ensayos al fuego | Superconcentrado | 8 |
| FUNDICIÓN | Ensayos al fuego | Fundido | 8 |
| MANEJO AMBIENTAL | Absorción atómica | Ambientales | 4 |

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

$$\text{Costo de la energía eléctrica (\$)} = \text{consumo energía (kW-h/mes)} \times \text{tarifa kW (\$)}$$

• 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 de masa hídrico, 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

$$\text{Costo del agua (\$)} = \text{consumo de agua (m}^3\text{/mes)} \times \text{tarifa m}^3\text{ (\$)}$$

• 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.

Figura 9.45. Costo de energía eléctrica, ruta metalúrgica 2. 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 | 7,2 | 1 | 8 | 57,6 | 1.498 |
| | Criba vibratoria | 2 | 1,5 | 1,2 | 1 | 8 | 9,6 | 250 |
| | Trituradora de martillos | 25 | 18,75 | 15 | 1 | 8 | 120 | 3.120 |
| | Banda transportadora | 3 | 2,25 | 1,8 | 1 | 8 | 14,4 | 374 |
| | Molino de bolas primario | 30 | 22,5 | 20,25 | 1 | 8 | 162 | 4.212 |
| | Bomba de sólidos | 7,5 | 5,625 | 4,5 | 1 | 8 | 36 | 936 |
| | Total trituración y molienda | | | | | | | 10.390 |
| CONCENTRACIÓN | Mesa de concentración secundaria | 2 | 1,5 | 1,2 | 1 | 8 | 9,6 | 250 |
| | Celdas de flotación circulares | 12 | 9 | 7,2 | 2 | 8 | 115,2 | 2.995 |
| | Tanque espesador | 2 | 1,5 | 1,2 | 2 | 8 | 19,2 | 499 |
| | Tanque acondicionador | 5 | 3,75 | 3 | 1 | 8 | 24 | 624 |
| | Total concentración | | | | | | | 4.368 |
| MANEJO AMBIENTAL | Tanque agitado para neutralización | 12 | 9 | 7,2 | 1 | 8 | 57,6 | 1.498 |
| | Bombas para recirculación de aguas y soluciones | 5 | 3,75 | 3 | 4 | 8 | 96 | 2.496 |
| | Total manejo ambiental | | | | | | | 3.994 |
| | | | | | | | Total | 18.751 |

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

$$\text{Costo de depreciación (\$)} = \frac{\text{valor comercial del equipo (\$)}}{\text{tiempo de vida útil (meses)}}$$

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.

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 gravimétrica

$$\text{Oro recuperado por tonelada (g)} = \text{tenor (g)} \times \% \text{ de recuperación total}$$

La siguiente tabla muestra el porcentaje de recuperación por concentración gravimétrica y la cantidad de oro que se recuperaría por cada tonelada beneficiada.

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 | 43,2 | 100 | 43,2 |
| 1 | 43,2 | 45,1 % | 19,48 |

(*) Con la implementación de la propuesta tecnológica se puede alcanzar mínimo un 45,1 % de recuperación de oro por tonelada, mediante concentración gravimétrica. (**) Para la zona minera de Mercaderes (unidad geometalúrgica 2) se determinó que el tenor es de 43,2 gramos, por tonelada.

Una vez se ha determinado la cantidad de oro recuperado en el proceso de concentración gravimétrica por cada tonelada de mineral beneficiado, se emplea la siguiente fórmula para establecer la cantidad de oro que se recupera en un mes con la aplicación de este método:

Fórmula para calcular la producción de oro mensual mediante concentración gravimétrica

$$\text{Producción de oro mensual (g)} = \text{oro recuperado por tonelada (g)} \times \text{mineral procesado mensualmente (t)}$$

Posteriormente se utiliza la siguiente fórmula para determinar los ingresos mensuales por la venta de oro recuperado mediante concentración gravimétrica:

Fórmula para calcular los ingresos mensuales por venta de oro recuperado mediante concentración gravimétrica

$$\text{Ingresos totales mensuales (\$)} = \text{producción mensual de oro (g)} \times \text{precio del oro (\$/g)}$$

Ingresos por venta de concentrados polimetálicos

La implementación de la propuesta de ruta metalúrgica 2 plantea como alternativa para la generación de ingresos por la venta de concentrados polimetálicos resultantes del proceso de flotación y de las colas del proceso de refinación.

En este escenario, el oro que se paga en el mercado por los concentrados polimetálicos depende del tenor del material.

En el caso de los concentrados de flotación, que tienen un tenor de 49,9 g/t, en el mercado de polimetálicos el comprador pagaría el 56% del oro contenido, como se muestra en la figura 9.47.

Figura 9.47. Venta de concentrados de flotación. Fuente: autores.

| t/día* | TENOR g/t | ORO/DÍA (g) | PORCENTAJE DE ORO A PAGAR | ORO PAGADO TOTAL/DÍA (g) |
|--------|-----------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| 1,72 | 49,9 | 86,06 | 56,0 % | 48,20 |

(*) Esta masa corresponde a los concentrados que se producirían con el procesamiento diario de 10 toneladas de mineral.

En contraste, del material resultante de las colas de refinación, que tienen un tenor de 123,6 g/t, en el mercado de polimetálicos se pagaría el 65,5% del oro contenido, como se detalla en la siguiente tabla:

Figura 9.48. Venta de colas de refinación. Fuente: autores.

| t/día* | TENOR g/t | ORO/DÍA (g) | PORCENTAJE DE ORO A PAGAR | ORO PAGADO TOTAL/DÍA (g) |
|--------|-----------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| 1,06 | 123,6 | 130,57 | 65,5 % | 85,52 |

(*) Esta masa corresponde a las colas de refinación que se producirían con el procesamiento diario de 10 toneladas de mineral.

Para resumir, la generación de ingresos/día por venta de oro, en el proyecto de implementación de la ruta metalúrgica 2, se calcula sobre 328,5 gramos de oro, que corresponden al mineral recuperado en 10 toneladas de mineral beneficiado. Esta cantidad de oro por día está representado en 194,8 g del oro fundido producto de la concentración gravimétrica, 48,2 g del oro que los compradores pagarían por los concentrados de flotación y 85,52 g del oro que los compradores pagarían por las colas de refinación.

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

$$\text{Regalías del año 1 (\$)} = \text{producción de oro año 1 (g)} \times \text{precio fijado por el Banco de la República en el año 1 (\$/g)} \times 4\%$$

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 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 (\$)

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 la Constitución Política de Colombia de 1991, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación económica.

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 (\$)

9.7.2.2. 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)

$$\text{Relación beneficio/costo} = \frac{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN, Ingresos}_t\$)}{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN, Costos}_t\$)}$$

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 MERCADERES, 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 9.49. Inversión inicial, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COSTO COP (\$)* | % PARTICIPACIÓN SOBRE COSTOS TOTALES |
|--|----------------------|--------------------------------------|
| Activos fijos | | |
| Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de extracción | 142.724.021 | 13 % |
| Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de beneficio | 772.762.677 | 73 % |
| Instalaciones eléctricas e hidráulicas | 150.823.999 | 14 % |
| Total activos fijos | 1.066.310.697 | |

(*) Los precios cotizados se encuentran detallados en el informe técnico.

Figura 9.50. Costos de la fase de extracción, por mes, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COP \$ | |
|-------------------------------------|-------------------|----------------|
| Mantenimiento | 1.070.430 | 4.117 |
| Depreciación de maquinaria y equipo | 1.189.367 | 4.574 |
| Energía eléctrica | 1.255.850 | 4.830 |
| Partes y accesorios | 2.830.052 | 10.885 |
| Herramientas y suministros | 3.502.966 | 13.473 |
| Elementos de seguridad industrial | 4.458.271 | 17.147 |
| Mano de obra | 14.290.352 | 54.963 |
| Combustible y explosivos | 27.116.376 | 104.294 |
| Total | 55.713.664 | 214.283 |

(*) El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 209.709/t.

Figura 9.51. Estructura de los costos futuros de la fase de extracción de oro, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

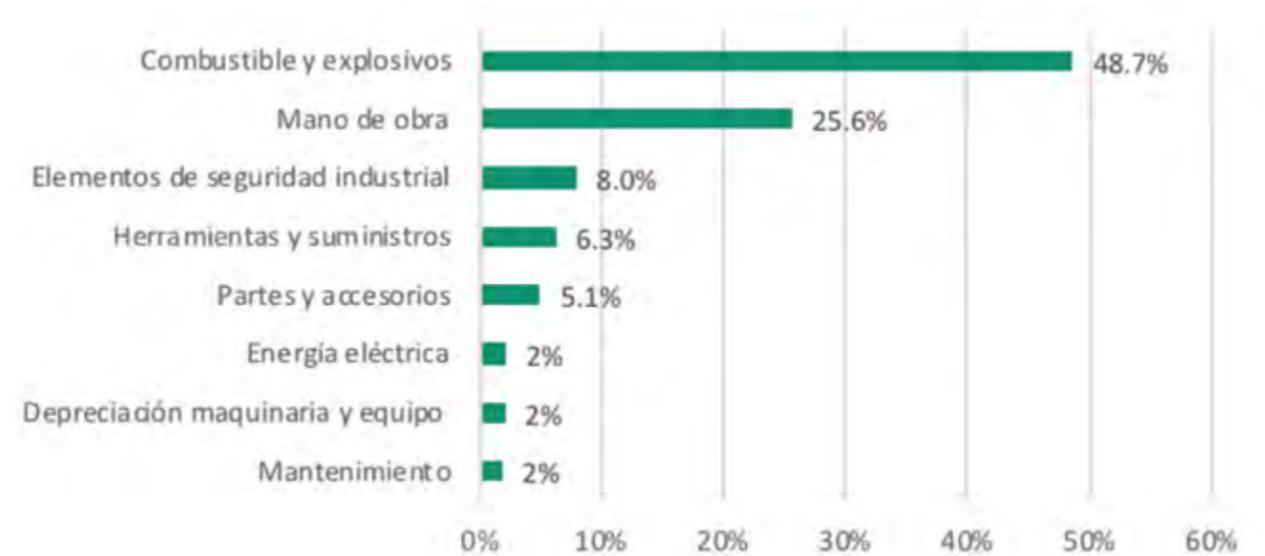


Figura 9.52. Costos de operación total (extracción + beneficio), por mes, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COP (\$) |
|---|--------------------|
| COSTOS DIRECTOS | |
| Materia prima (costo de extracción) | 54.524.297 |
| Insumos | 9.588.988 |
| Mano de obra | 10.003.272 |
| Mantenimiento | 5.795.720 |
| Análisis y pruebas de laboratorio | 14.300.000 |
| Servicios públicos | 10.993.276 |
| Depreciación | 7.629.056 |
| Total costos directos | 112.834.609 |
| COSTOS INDIRECTOS | |
| Costos indirectos de fabricación (CIF) | 11.283.461 |
| Total costos directos + indirectos | 124.118.070 |

Figura 9.53. Estructura de los costos futuros de la fase de beneficio de oro, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.



Figura 9.54. Ingresos de operación futura, por mes, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

| PROCESO | TENOR (g/t) | RECUPERACIÓN DE ORO / ORO PAGADO POR TENOR EN CONCENTRADOS(%) | VOLUMEN MINERAL O PRODUCCIÓN CONCENTRADOS t/día | ORO PAGADO POR CONCENTRADOS (g/mes) | PRODUCCIÓN DE ORO PARA VENTA (g/mes) | PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)* | COP (\$) |
|----------------------------|-------------|---|---|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Concentración gravimétrica | 43,2 | 45,1 | 10 | | 5.066 | 119.815 | 606.938.698 |
| Concentrados de flotación | 49,9 | 56,0 % | 1,72 | 1.253 | | 119.815 | 150.138.803 |
| Colas de refinación | 123,6 | 65,5 % | 1,06 | 2.224 | | 119.815 | 266.417.098 |
| Total | | | | 3.477 | 5.066 | | 1.023.494.599 |

(*) 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 9.55. 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 (-) | -1,066,310,697 | | | | | |
| TOTAL INVERSIÓN INICIAL | -1,066,310,697 | | | | | |
| (2) INGRESOS GRAVABLES (+) | | | | | | |
| Ingresos Operacionales | | 12,281,935,190 | 12,650,393,246 | 13,029,905,043 | 13,420,802,194 | 13,823,426,260 |
| TOTAL INGRESOS GRAVABLES | | 12,281,935,190 | 12,650,393,246 | 13,029,905,043 | 13,420,802,194 | 13,823,426,260 |
| (3) EGRESOS DEDUCIBLES (-) | | | | | | |
| Costos Operacionales | | 1,397,868,173 | 1,427,273,016 | 1,457,587,506 | 1,488,840,539 | 1,521,061,953 |
| Regalías (4%) | | 233,064,460 | 240,056,394 | 247,258,086 | 254,675,828 | 262,316,103 |
| Depreciación | | 91,548,670 | 91,548,670 | 91,548,670 | 91,548,670 | 91,548,670 |
| TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES | | 1,722,481,303 | 1,758,878,079 | 1,796,394,261 | 1,835,065,037 | 1,874,926,726 |
| (4) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS | | 10,559,453,887 | 10,891,515,166 | 11,233,510,782 | 11,585,737,157 | 11,948,499,534 |
| (5) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL | | 86.0% | 86.1% | 86.2% | 86.3% | 86.4% |
| (6) IMPUESTOS (-) | | | | | | |
| IMPUESTO DE RENTA (33%) (-) | | 3,484,619,783 | 3,594,200,005 | 3,707,058,558 | 3,823,293,262 | 3,943,004,846 |
| TOTAL IMPUESTOS | | 3,484,619,783 | 3,594,200,005 | 3,707,058,558 | 3,823,293,262 | 3,943,004,846 |
| (7) UTILIDAD NETA | | 7,074,834,104 | 7,297,315,161 | 7,526,452,224 | 7,762,443,895 | 8,005,494,688 |
| (8) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA | | 57.6% | 57.7% | 57.8% | 57.8% | 57.9% |
| (9) DEPRECIACIÓN (+) | | 91,548,670 | 91,548,670 | 91,548,670 | 91,548,670 | 91,548,670 |
| (10) FLUJO NETO DE EFECTIVO | -1,066,310,697 | 7,166,382,774 | 7,388,863,831 | 7,618,000,894 | 7,853,992,565 | 8,097,043,358 |

9.8.1. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES DE EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE MERCADERES, RUTA METALÚRGICA 2

El VPN del proyecto de la zona minera de Mercaderes correspondiente a la ruta metalúrgica 2, a una tasa de descuento del 30%, es de COP 17.216.526.545

El VPN del proyecto de la zona minera de Mercaderes correspondiente a la ruta metalúrgica 2, a una tasa de descuento del 40%, es de COP 14.148.579.884

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 30 y 40% anuales. Se concluye que este proyecto se justifica desde el punto de vis-

Figura 9.56. Indicadores ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | TASA DE DESCUENTO 30 % | TASA DE DESCUENTO 40 % |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Valor presente neto (VPN) | \$ 17.216.526.545 | \$ 14.148.579.884 |
| Tasa interna de retorno (TIR) | 675 % | 675 % |
| Relación beneficio/costo (RB/C) | 8,90 | 8,89 |

ta 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 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 MERCADERES, 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 Mercaderes, 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.

9.9.1. RESULTADOS DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE MERCADERES

Figura 9.57. Variables de operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de mercaderes. Fuente: autores.

| VARIABLE | VALOR |
|---|------------|
| Tiempo de trabajo en mina | 4 h/día |
| Volumen de material de mina extraído | 1,13 t/día |
| Volumen de material estéril extraído | 0,68 t/día |
| Volumen de material mineral extraído | 0,45 t/día |
| Capacidad de procesamiento | 0,1125 t/h |
| Funcionamiento de la planta | 4 h/día |
| Volumen de procesamiento | 0,45 t/día |
| Turnos por día | 1 por día |
| Días de operación al mes | 20 días |
| Volumen de procesamiento | 9 t/mes |
| Tenor por tonelada de material de mina | 43,2 g/t |
| Porcentaje total de recuperación de oro | 65,0 % |
| Recuperación total de oro | 28,08 g/t |

Figura 9.58. Costos actuales de la fase de extracción, por mes. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COP \$ | COP \$/t (*) |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| Mano de obra | 8.574.211 | 952.690 |
| Partes y accesorios | 656.533 | 72.948 |
| Herramientas y suministros | 809.897 | 89.989 |
| Combustible y explosivos | 1.058.520 | 117.613 |
| Elementos de seguridad industrial | 1.245.409 | 138.379 |
| Mantenimiento | 454.207 | 50.467 |
| Energía eléctrica | 690.027 | 76.670 |
| Depreciación maquinaria y equipo | 504.675 | 56.075 |
| Total | 13.993.479 | 1.554.831 |

(*) El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 1.158.081/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 9.59. Estructura de costos actuales de la fase de extracción de oro. Fuente: autores.



Figura 9.60. Estructura de costos actuales de la fase de extracción de oro. Fuente: autores.

| DESCRIPCIÓN | COP (\$) |
|---|-------------------|
| COSTOS DIRECTOS | |
| Materia prima | 13.488.804 |
| Insumos | 2.055.033 |
| Mano de obra | 4.287.106 |
| Mantenimiento | 450.300 |
| Servicios públicos | 2.056.682 |
| Depreciación de maquinaria y equipo | 1.450.333 |
| Total costos directos | 23.788.258 |
| COSTOS INDIRECTOS | |
| Costos indirectos de fabricación (CIF) | 2.378.826 |
| Total costos directos + indirectos | 26.167.084 |

Figura 9.61. Estructura de los costos actuales de la fase de beneficio. Fuente: autores.

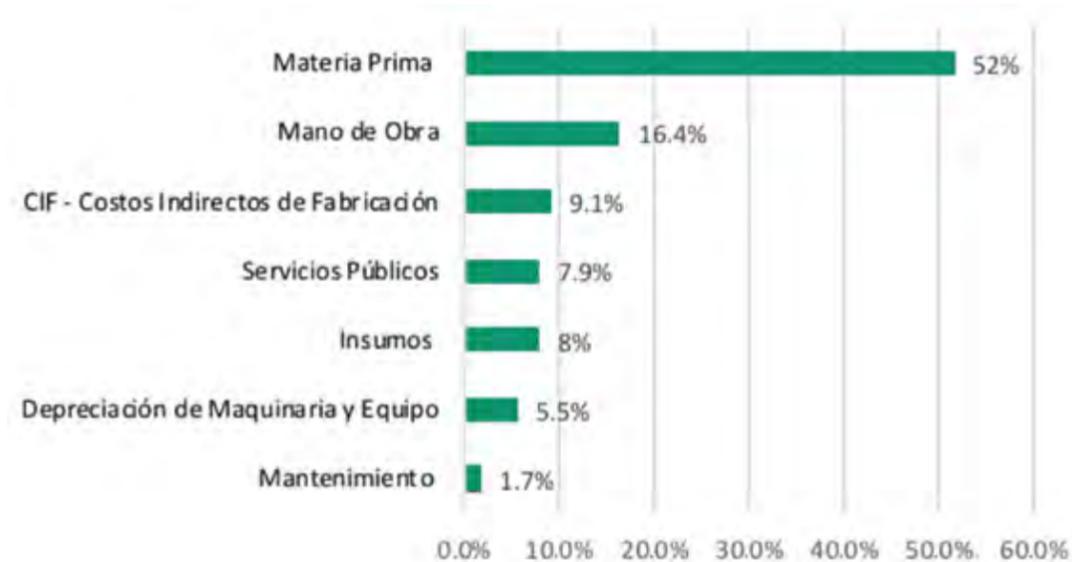


Figura 9.62. Ingresos de la operación actual, por mes, situación actual. Fuente: autores.

| PROCESO | TENOR (g/t) | RECUPERACIÓN DE ORO (%) | RECUPERACIÓN DE ORO (g/t) | RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes) | PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)* | COP (\$) |
|--------------|-------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------|
| Amalgamación | 43,2 | 65 | 28,08 | 253 | 119.815 | 30.279.647 |

(*) 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 9.63. 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 | 363,355,762 | 374,256,434 | 385,484,127 | 397,048,651 | 408,960,111 |
| TOTAL INGRESOS GRAVABLES | 363,355,762 | 374,256,434 | 385,484,127 | 397,048,651 | 408,960,111 |
| (2) EGRESOS DEDUCIBLES (-) | | | | | |
| Costos Operacionales | 296,601,009 | 304,748,696 | 313,158,025 | 321,837,640 | 330,796,483 |
| Depreciación | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 |
| Regalías | 11,627,384 | 11,976,206 | 12,335,492 | 12,705,557 | 13,086,724 |
| TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES | 325,632,394 | 334,128,902 | 342,897,517 | 351,947,197 | 361,287,207 |
| (3) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS | 37,723,368 | 40,127,532 | 42,586,611 | 45,101,454 | 47,672,904 |
| (4) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL | 10.38% | 10.72% | 11.05% | 11.36% | 11.66% |
| (5) IMPUESTOS (-) | | | | | |
| IMPUESTO DE RENTA (33%) (-) | 12,448,711 | 13,242,086 | 14,053,582 | 14,883,480 | 15,732,058 |
| TOTAL IMPUESTOS | 12,448,711 | 13,242,086 | 14,053,582 | 14,883,480 | 15,732,058 |
| (6) UTILIDAD NETA | 25,274,656 | 26,885,447 | 28,533,029 | 30,217,974 | 31,940,846 |
| (7) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA | 6.96% | 7.18% | 7.40% | 7.61% | 7.81% |
| (8) DEPRECIACIÓN (+) | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 | 17,404,000 |
| (9) FLUJO NETO DE EFECTIVO | 42,678,656 | 44,289,447 | 45,937,029 | 47,621,974 | 49,344,846 |

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 9.64. Indicadores de la operación actual vs. la operación futura, ruta metalúrgica 2. Fuente: autores.

| INDICADOR | OPERACIÓN ACTUAL | OPERACIÓN FUTURA |
|--|------------------|------------------|
| Recuperación de oro (gr/t) | 65 % | 45,1 % |
| Cantidad de oro recuperado por tonelada | 28,08 gr | 19,48 gr |
| Costo de producción unitario por gramo de oro | COP 103.542 | COP 11.602 |
| Costo de producción unitario por onza troy de oro | USD 1.074 | USD 120 |
| Utilidad antes de impuestos por gramo de oro | COP 12.439 | COP 82.254 |
| Utilidad antes de impuestos por onza troy de oro | USD 129,0 | USD 853 |
| Margen de utilidad operacional (promedio 5 años) | 11,0 % | 86 % |
| Utilidad después de impuestos por gramo de oro | COP 8.334 | COP 55.110 |
| Utilidad después de impuestos por onza troy de oro | USD 86,4 | USD 571 |
| Margen de utilidad neta (promedio 5 años) | 7,4% | 58 % |
| Indicador de productividad (producto/insumo) | 1,16 | 8,25 |

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 MERCADERES, 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 611%, al pasar de una razón producto/insumo total de 1,16 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 8,25 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 103.542, mientras que se espera que, en la operación futura, el costo unitario del gramo de oro sea de COP 11.602. Este resultado indica una reducción efectiva de los costos unitarios de 869%.

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 por el método de concentración gravimétrica y la venta de concentrados de flotación y de las colas de refinación, resulta en un aumento del margen de utilidad neta proyectada para los cinco años evaluados, al pasar de 7,4%, en la actualidad, a 58%, 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 Mercaderes, el costo unitario de producir 1 g de oro es de COP 103.542, mientras que la implementación de la ruta metalúrgica 2 reduce este costo a COP 11.602.

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 561%.

9.10. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE MERCADERES

- En el estudio financiero de la operación actual de la planta se utilizó como referencia un porcentaje de recuperación de oro de 65% por cada tonelada de mineral procesado, obteniéndose este en el proceso de concentración gravimétrica y por medio de la amalgamación, de acuerdo con la información colectada en campo por el equipo técnico.
- Teniendo en cuenta que el tenor de la zona minera de Mercaderes es de 42,3 gramos por tonelada y que la operación actual permite una recuperación promedio del 65%, en el estudio financiero se estimó una recuperación de 28,08 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 1.498.756/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 elementos de seguridad industrial, cada uno con una participación sobre los costos totales de 61,3 y 8,9%, 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 52 y 16%, respectivamente.
- Se estableció que la planta de beneficio tiene un consumo de agua por cada tonelada de mineral procesado de aproximadamente 0,53 m³.
- 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 4.764 kW/mes, lo que equivale a un costo promedio de energía eléctrica mensual de COP 2.739.408.
- El costo unitario aproximado, teniendo en cuenta los parámetros de la operación actual definidos para la planta, es de COP 103.542 por cada gramo de oro y de USD 1.074 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 12.349/g de oro y de USD 129/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 11%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- La ganancia unitaria (después de pagar impuestos) aproximada es de COP 8.334/g de oro y de USD 86,4/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 7,4%, 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 MERCADERES, 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 3.120 toneladas de mineral, lo cual implica un funcionamiento de la planta de 26 días al mes y un procesamiento de 10 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 45,1%, por el método de concentración gravimétrica.
- Teniendo en cuenta que el tenor del material de cabeza promedio que se procesa en la planta es de 42,3 gramos, y que la implementación de la ruta metalúrgica 2 en la operación futura permite una recuperación mínima aproximada de 45,1% en el proceso de concentración gravimétrica, se espera una recuperación de 19,08 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 1.066.310.697.
- 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 49 y 26%, 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 44 y 12%, 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 20.935 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 11.602 por cada gramo de oro, y de USD 120 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 82.254/g de oro y de USD 853/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 86%, 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 55.110/g de oro y de USD 571/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 58%, 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 Mercaderes, 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 30 y 40% anuales.
- El período de recuperación de la inversión en adecuaciones con las tasas de interés de oportunidad del 30 y 40% anuales es inferior a un año.

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.

Detalle del riel de un molino chileno. Fotografía tomada por Fabián Ramírez, 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 feldespatos, 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 µm). 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 aluvión. 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 cerrados 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 yacientes 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 α = ángulo de buzamiento. En esta fórmula, el ángulo “ α ” 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 yacentes 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 (CH₄); monóxido de carbono (CO, explosivo en concentraciones entre 13 y 75%) y C₂H₂ y H₂S.

Gases nitrosos (NO y NO₂). 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 (N₂); dióxido de carbono (CO₂), que cuando es mayor que 15% en volumen, es mortal; metano (CH₄) y el gas de carburo (C₂H₂), 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) (H₂S) (su límite permisible es de 8 pm), que tiene olor a huevos podridos, y anhídrido sulfuroso (SO₂), 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 (O₂) 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 [PH₂O], 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 [CH₃Hg]⁺. 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, alunización, caolinización, silicificación, dolomitización, turmalinización, epidotización, argílica avanzada, sericitica, 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 mm² 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 compartimiento 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 SiO₂, 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

Detalle de carga de molino remolador. Fotografía tomada por Harold Concha, Servicio Geológico Colombiano

- 911 Metallurgist, P. E. (2018). 0.5 to 50 TPH Industrial Ball Mills. Disponible en <https://www.911metallurgist.com/equipment/ball-mills/> (Consultado el 23 de noviembre de 2018).
- 911metallurgist (2017) stopin mining methods. Consultado en <https://www.911metallurgist.com/stopin-mining-methods/#Square-Set-Stoping>.
- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento: tratamiento de aguas ácidas de mina. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Aguja Bocanegra, M. A.; Concha Perdomo, A. E. y Molano, J. C. (2009). Petrografía del pórfido de Santa Lucía, departamento del Cauca, Colombia. *Geología Colombiana*, 34, 95-110.
- Alcaldía Municipal Bolívar (2012). I Diagnóstico comunitario e institucional del municipio de Bolívar, Cauca, Plan de Desarrollo “Por nuestra tierra, hagamos la diferencia”, 2012-2015.
- Alcaldía Municipal de Almaguer (2006). Plan de Ordenamiento Territorial de Almaguer, Cauca.
- Austín, L. G. y Concha, F (eds.) (1994). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. Concepción: Cytel.
- Benvindo da Luz, A., Sampaio, J. y França, S. C. (eds.) (2010). Tratamiento de minérios (5.ª ed.). Rio de Janeiro: CETEM-MCT.
- Bulatovic, S. M. (2007). Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and practice. Vol. 1: Flotation of sulfide ores. Elsevier Science.
- Camprubí, A., González, E., Levresse, G., Tritlla, J. y Carrillo, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. UNAM. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo I. VI, núm. 1, 10-18.
- Carboandes (2010), en Miranda Gold Corp. (2018). Miranda Gold signs option agreement on advanced Gold-Copper Project in Colombia MAD-NR2018-06-Cauca-Option-Agree_FINAL.pdf Disponible en http://www.mirandagold.com/i/pdf/MAD-NR2018-06-Cauca-Option-Agree_FINAL.pdf
- Cediel, F. y Cáceres, C. (2000). Geological map of Colombia (3.ª ed.). Bogotá: Geotec, Ltd.
- CCRR (2018) Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, Agencia Nacional de Minería, Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales. 2018.
- CIMM T&S (2007). Aplicación de test SPLP, test ABA y evaluación de generación neta de acidez a muestras geológicas de Compañía Minera del Pacífico. Santiago de Chile.
- Clark, G. B., Hustrulid, W. A. y Mero, J. L. (2017). Mining. Enciclopedia británica. Disponible en <https://www.britannica.com/technology/mining/Underground-mining>.
- Coles, C., & Cochrane, K. (2006). Mercury Cyanide Contamination of Grounwater from Gold. *Sea to Sky Geotechnique*, 1118–1122.
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, Agencia Nacional de Minería (2018). Estándar colombiano para el reporte público de resultados de exploración, de recursos y reservas minerales. Bogotá: CCRR. Disponible en https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/2758_publica_cuadernos_espanol_mp.pdf
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 100 de 1993. “Por la cual se crea el sistema de seguridad social integral y se dictan otras disposiciones”. Bogotá, 1993.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 685 de 2001. “Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones”. Bogotá, 2001.

- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 1607 de 2012. “Por la cual se expiden normas en materia tributaria y se dictan otras disposiciones”. Bogotá, 2012.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 1819 del 29 de diciembre de 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, 2016.
- DANE (s. f.). Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal por área 1985-2020. Disponible en https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/Municipal_area_1985-2020.xls.
- Darling Peter; Society for Mining, Metallurgy and Exploration (U.S) (2011). Mining engineering-Handbooks, manuals.
- Denver, E. (1954). Denver Equipment Company Handbook. Denver, Colorado: Denver Equipment Co.
- Environmental Protection Agency (1992). Procedure Toxicity Characteristic Leaching. Method 1311.USA Norm. Disponible en <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1311.pdf>
- Environmental Protection Agency (1992). Procedure Toxicity Characteristic Leaching. Method 1311.USA Norm. Disponible en <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1311.pdf>
- Foucher, D., Hintelmann, H., Al, T. A., & MacQuarrie, K. T. (2013). Mercury isotope fractionation in waters and sediments of the Murray Brook mine watershed (New Brunswick, Canada): Tracing mercury contamination and transformation. *Chemical Geology*, 336, 87–95. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.014>
- García Arreola, M. E., Soriano Pérez, S. H., Flores Vélez, L. M., Cano Rodríguez, I. y Alonso Dávila, P. A. (2015). Comparación de ensayos de lixiviación estáticos de elementos tóxicos en residuos mineros. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14 (1), 109-117.
- Gobernación del Cauca (2012). La línea base de indicadores socioeconómicos: diagnóstico de condiciones sociales y económicas, municipio de Almaguer. Disponible en http://www.cauca.gov.co/sites/default/files/informes/municipio_de_almaguer_0.pdf
- Gobernación del Cauca (2012). La Línea base de indicadores socioeconómicos: Diagnóstico de condiciones sociales y económicas, municipio de La Sierra. Disponible en https://www.cauca.gov.co/sites/default/files/informes/municipio_de_la_sierra_0.pdf
- Godfellow, W. D. y Lydon, J. W. (2007). Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. En W. D. Goodfellow (ed.), *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication n.º 5*, 163-183.
- Goldfarb, J., Groves, D. y Gardoll, S. (2001). Orogenic gold and geologic time: A global synthesis: *Ore. Geology Reviews*, 18, 1-75.
- Gómez Gutiérrez, D. F. y Molano Mendoza, J. C., (2009). Evaluación de zonas de alteración hidrotermal y fases intrusivas, para el prospecto ‘stock Porfirítico de Piedra Sentada’ (vereda Santa Lucía), Cauca, Colombia. *Geología Colombiana*, 34, 75-94.
- Hart, C., McCoy, D., Goldfarb, R., Smith, M., Roberts, P., Hulstein, R., Bakke, A. y Bundtzen, T. (2002). *Geology, exploration and discovery in the Tintina gold province, Alaska and Yukon. Society of Economic Geologists Special Publication 9*, 241-274.
- Here are the types of underground mining and their applications (2018). Science Struck. Disponible en <https://sciencestruck.com/types-of-underground-mining-their-applications>.
- 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, Division Chuquicamata de Codelco, La Serena, Chile, 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
<http://cdim.esap.edu.co/bancomedios/Documentos%20PDF/bolivarBolivar%20-pd-2012-2015.pdf>
- JICA (1987). Informe sobre exploración de minerales del área de Almaguer, departamento del Cauca, Colombia. Fase III. Japan International Cooperation Agency (JICA).
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. CRC press.
- Lawrence, R. W., y Scheske, M. (1997). A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*, 32 (2), 100-106.
- Lawrence, R. W., y Scheske, M. (1997). A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*, 32 (2), 100-106.
- Leal, H., Melgarejo, J. y Shaw, R. (2011). *Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach* (memoria de tesis doctoral). Universidad de Barcelona.
- Leal, L. T. C. (2015). Drenajes ácidos de mina: formación y manejo. *Revista Esaica*, 1 (1), 53-57.
- López, F. (2009). *Manual de trituración y cribado* (3.ª ed.). Tampere: Metso.
- Lydon, J. W. (2007). An overview of the economic and geological contexts of Canada’s major mineral deposit types. En Goodfellow, W D (ed.), *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, special publication, n.º 5*, 3-48.
- 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.
- Martínez López, C., Torres Agredo, J., Gutiérrez, M. D., Mellado Romero, A. M., Paya Bernabeu, J. J., y Monzó Balbuena, J. M. (2013). Uso de test de lixiviación para determinar la migración de contaminantes en morteros de sustitución con residuos de catalizador de craqueo catalítico (FCC). *Revista de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín*, 80 (181), 163-170).
- Meza Orozco, J. J. (2010). *Evaluación financiera de proyectos*. Bogotá: Ecoe ediciones.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2005). Decreto 4741 de 2005 (“Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP”, tabla 3 del anexo III).
- Ministerio De Medio Ambiente. *Plan único nacional de mercurio* (2014)
- Ministerio De Medio Ambiente y Desarrollo Sosotenible (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.
- Ministerio de Minas y Energía (2015). *Glosario técnico minero*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía (2017). *Glosario técnico minero*. Bogotá.
- MME (1988) *Ministerio de Minas y Energía. Métodos de explotación minera, Vetas y Aluvión*.
- Ministerio de Minas y Energía (2015)) *Ministerio de Minas y energía, Decreto 1886. Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas*.
- Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2001). *Guía minero ambiental: explotación*. Bogotá.
- Morales, A. (2003). Determinación y mitigación del potencial de generación ácido en botaderos de estériles mina del proyecto Desarrollo Teniente División EL Teniente, Codelco, Chile. En *Congreso Geológico Chileno, Concepción*.
- Monsacro (2006) imagen rampla y testereros <https://minasderiosa.blogspot.com/2006/06/rampla-y-testeros.html>.

- Municipio de La Sierra (2016). Plan Básico de Ordenamiento Territorial. Disponible en <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/sierra/DIAG%20SUELOS.pdf>
- 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.
- Orrego, A. y Acevedo, A., (1996). Geología de la plancha 364, Timbío: memoria explicativa. Escala 1:100.000. Bogotá: Ingeominas.
- Orrego, A., París, G., Ibáñez, D. y Vásquez, E. (1996). Geología de la plancha 387, Bolívar. Escala 1:100.000. Bogotá: Ingeominas.
- ONU (2017) Organización de las Naciones Unidas Métodos y Herramientas-Determinación del uso de mercurio artesanal y en pequeña escala (MAPE).
- París, G. y Marín, P. (1979). Mapa geológico generalizado del departamento del Cauca. Memoria explicativa, Escala 1:350.000. Bogotá: Ingeominas.
- Positiva, Compañía de Seguros (2017). Guía de seguridad para ventilación de minas subterráneas. Bogotá: Positiva.
- Rincón, A. (2009). Microtermometría de inclusiones fluidas, aplicada a un pórfido de cobre (trabajo de grado). Bogotá: Departamento de Geociencias, Universidad Nacional.
- Sena(2001) Servicio Nacional de Aprendizaje Sena, Cartillas de sostenimiento de minas.
- SGC (2016). Mapa de depósitos minerales de Colombia. Disponible en <https://www2.sgc.gov.co/Programas-DelInvestigacion/DireccionTecnicaRecursosMinerales/Paginas/Mapa-metalogenico-de-Colombia.aspx>.
- ScienceStruck (2018) Tipos de minería subterránea y sus aplicaciones. Consultado en <https://sciencestruck.com/types-of-underground-mining-their-applications>.
- Simonin, P. (1867). La vie souterraine ou les mines et les mineurs. Paris: Imprimerie Generale de CH. Lahure.
- Taggart, A. F. (1945). Handbook of mineral dressing (vol. 1). New York: Wiley & Sons.
- The University of Queensland (2017), "Spectrophotometry" [en línea], disponible en: <https://di.uq.edu.au/community-and-alumni/sparq-ed/sparq-ed-services/spectrophotometry>, recuperado: 07 de Febrero de 2019.
- Thermo Fisher Scientific, 2019. Portable Analysis for Material ID. Disponible en www.thermoscientific.com/portableid
- Tuck Michael (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>.
- Utter, T., (1984). Geological setting of primary gold deposits of the Andes of Colombia (South America). En R. P. Foster (ed.), Gold '82: The geology, geochemistry and genesis of gold deposits. Rotterdam: Balkema, 731-753.
- 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. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.010>.
- Wills, B. A. y Finch, J. (2016). Wills' Mineral Processing Technology (8.ª ed.). Montreal: Elsevier.

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

MERCADERES (CAUCA)



El futuro
es de todos

Minenergía

ISBN: 978-958-52286-5-8



SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO

