

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**PROPUESTA DE PLAN DE CIERRE PROGRESIVO DE MINA  
EN EL CUADRILÁTERO FERRÍFERO SAN ISIDRO DE  
C.V.G FERROMINERA ORINOCO C.A.  
CIUDAD PIAR ESTADO BOLÍVAR.**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Blanco H. Ysaida A  
Para optar al título de  
Ingeniero de Minas

Caracas, octubre de 2007

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **PROPUESTA DE PLAN DE CIERRE PROGRESIVO DE MINA EN EL CUADRILÁTERO FERRÍFERO SAN ISIDRO DE C.V.G FERROMINERA ORINOCO C.A. CIUDAD PIAR ESTADO BOLÍVAR.**

**Tutor académico: Prof. Alba J. Castillo P.**  
**Tutor industrial: Ing. Zulmer C. Andara Q.**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Blanco H. Ysaida A  
Para optar al título de  
Ingeniero de Minas

Caracas, octubre de 2007

Caracas, octubre de 2007

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Ysaida A. Blanco H. titulado:

**“Propuesta de plan de cierre progresivo de mina en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro de C.V.G Ferrominera Orinoco C.A. Ciudad Piar estado Bolívar”.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

---

Prof.  
Jurado

---

Prof.  
Jurado

---

Prof. Alba J. Castillo  
Tutora Académica

---

Ing. Zulmer C. Andara  
Tutora Industrial

## ***Agradecimientos***

*Ante todo debo dar gracias a Dios por permitirme llegar hasta aquí.*

*A mi ilustre Universidad Central de Venezuela, por cobijarme en sus espacios y darme las herramientas para ser una profesional.*

*A C.V.G Ferrominera Orinoco C.A., por permitirme realizar mi investigación en sus instalaciones.*

*A la Prof. Alba Castillo, por ser mi tutora académica, tener la paciencia y disposición de acompañarme y guiarme en este trabajo.*

*A la Ing. Zulmer Andara, por ser mi tutora industrial y apoyar este trabajo.*

*A Simona Herrera mi madre, por enseñarme que la constancia y la decisión son la base para lograr todo los sueños.*

*A Ysaías Blanco mi padre, por el ejemplo de lucha firme, que siempre me ha dado.*

*A mi tío José Herrera, por ser siempre mi apoyo.*

*A los Ingenieros Mayra Córdoba y Andrés Gómez, del departamento de Planificación y Desarrollo de Mina, en Ciudad Piar, por haberme abierto las puertas de su casa y hacerme sentir como en la mía.*

*A mi amiga Clara Viana, por ayudarme a obtener el tema de esta investigación y estar siempre dispuesta a apoyarme en todo momento.*

*A la Lic. María Angélica Falcón, por apoyarme en realizar parte de este trabajo.*

*A la Sra. María Teresa Espinosa, por brindarme siempre su mano amiga.*

*A todos los que no he nombrado, pero que de una u otra manera me apoyaron para terminar esta investigación.*

***A TODOS MI ETERNO Y PROFUNDO  
AGRADECIMIENTO.***

*Ysaida A. Blanco H.*

***Dedicatoria***  
***A la memoria de:***

*Mis tíos José Rafael Blanco Muñoz y  
Marlene Josefina Blanco Muñoz  
Mis abuelos Juan Ismael Herrera Díaz e  
Isac María Blanco.*

**Blanco Herrera, Ysaida Antonieta**

**PROPUESTA DE PLAN DE CIERRE PROGRESIVO DE MINA  
EN EL CUADRILÁTERO FERRÍFERO SAN ISIDRO DE C.V.G  
FERROMINERA ORINOCO C.A. CIUDAD PIAR ESTADO  
BOLÍVAR.**

**Tutora Académica: Profesora Alba J. Castillo. Tutora Industrial: Ingeniera  
Zulmer C. Andara. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de  
Geología, Minas y Geofísica. 2007, 224pp.**

**Palabras Claves:** Cierre de mina, Plan de cierre de mina, Criterios para cierre de mina, Control de Sedimentos, Recuperación ambiental, Reforestación, Estabilidad de taludes, Impacto social de la minería, estado Bolívar, modelaje.

### **Resumen**

El presente trabajo tiene como finalidad proponer un plan de cierre progresivo de mina para el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro (CFSI), compuesto por cuatro minas explotadas a cielo abierto, San Isidro (SI), Los Barrancos (LB), Las Pailas (LP) y San Joaquín (SJ), ubicados al norte del estado Bolívar, en el municipio Raúl Leoni, al sur-este del poblado de Ciudad Piar. Se realizaron inspecciones a los cerros en explotación y se establecieron los criterios necesarios para planificar el cierre del mismo. Estos fueron, estabilización de taludes, revegetación de áreas agotadas, vinculación de la comunidad en el proceso de planificación para nuevo cambio de uso del territorio y principalmente el control del proceso erosión-sedimentación. Las inspecciones a las minas demostraron, la necesidad de revisar el diseño geométrico de taludes ejecutado, la urgencia de actualizar el sistema de drenaje, también mediante encuesta aplicada se determinó el deseo de que al agotarse el uso minero, el nuevo uso sea recreativo y la ausencia de conocimiento sobre los planes de cierre de mina. Se estimó el orden de agotamiento de los yacimientos: Las Pailas en el año 2020; San Isidro en el 2031; Los Barrancos en el 2041 y San Joaquín en el año 2045. Se recuperaron muestras de suelo en las laderas de las minas operativas, que por las aguas de escorrentía van a dar a los cursos naturales superficiales, específicamente quebradas como Arasiama, ya afectada por el fenómeno de la colmatación, Merecito y La Puertica, estos suelos fueron caracterizados según la clasificación unificada de suelos como arena fina limosa y limo arenoso (SM-ML), con poca presencia de arcilla. Se evidenció la conveniencia de realizar análisis granulométrico por vía húmeda, ya que se reporta con este procedimiento el valor real de finos y semeja la

condición real de suelo saturado. También se realizó ensayo de determinación de peso específico (G) estos dieron resultados muy altos: 4,38 en la mina LB; 4,17 en la mina LP; mientras que en las muestras de SI resultaron ser más bajos 2,56, se puede inferir la pérdida de mena. Para definir el posible nuevo uso de las áreas mineras se modeló la secuencia de explotación de cada una de las minas y se evidenciaron los cambios topográficos, las geoformas generadas y el de mina. Se propone principalmente como nuevo uso para SI, la creación de un área recreativa que incluya un lago, para LB convertir en miradores y paradores turísticos las terrazas agotadas, en LP zonas de reservorio de agua, balnearios aprovechando el recurso hidrotermal que posee o depósito de materiales y desechos industriales y finalmente el SJ la creación de un museo y un aula minera, para impartir clases de formación a los nuevos profesionales que necesita la industria nacional en expansión.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>19</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	21
1.2.1 Objetivo general .....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	21
1.4 ALCANCE E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	22
1.5 MARCO TEÓRICO .....	23
1.5.1 Antecedentes.....	23
1.5.2 Tipo de investigación .....	25
1.5.3 Diseño de la investigación.....	25
1.5.4 Población y muestra .....	26
1.5.5 Técnicas e instrumentos en la recolección de los datos .....	27
1.5.6 Análisis de los datos .....	27
<b>CAPÍTULO II. ASPECTOS FÍSICO – NATURALES DEL CUADRILÁTERO FERRÍFERO SAN ISIDRO.....</b>	<b>29</b>
2.1 LOCALIZACIÓN Y ACCESO.....	29
2.2 CLIMA.....	30
2.3 VIENTOS.....	31
2.4 HIDROLOGÍA.....	31
2.5 GEOLOGÍA .....	32
2.5.1 Geología regional y local.....	32
2.5.2 Génesis de los yacimientos.....	34
2.5.3 Reservas geológicas.....	35
2.6 SUELOS.....	35
2.7 VEGETACIÓN .....	36
2.8 FAUNA.....	39
2.9 DEMOGRAFÍA .....	40
2.10 CUADRILÁTERO FERRÍFERO SAN ISIDRO.....	41
2.10.1 San Isidro.....	41
2.10.2 Los Barrancos.....	42
2.10.3 San Joaquín.....	43
2.10.4 Las Pailas.....	44
<b>CAPÍTULO III. GENERALIDADES DE C.V.G FERROMINERA ORINOCO C.A. .....</b>	<b>45</b>
3.1 C.V.G FERROMINERA ORINOCO C.A.....	45
3.2 TIPOS LITOLÓGICOS DE MENAS DE HIERRO .....	45

3.3 OPERACIONES MINERAS.....	49
3.4 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS .....	53
3.4.1 Características del diseño geométrico de bancos .....	54
3.5 DEPÓSITOS Y ESCOMBRERAS.....	55
3.5.1 Características del diseño geométrico de los depósitos y/o escombreras.....	56
3.6 RESERVAS RECUPERABLES .....	57
3.6.1 Modelo tridimensional del depósito .....	58
3.6.2 Optimización de la fosa final basada en “Cono Flotante” .....	58
3.7 SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL .....	60
3.7.1 Programa de adecuación ambiental .....	60
3.8 PROYECTOS ESTRATÉGICOS .....	61
<b>CAPÍTULO IV .CIERRE DE MINA Y CRITERIOS PARA SU PLANIFICACIÓN</b> .....	<b>63</b>
4.1 LEGISLACIÓN AMBIENTAL VENEZOLANA VIGENTE .....	63
4.1.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. ....	63
4.1.2 Leyes Ambientales .....	64
4.1.3 Decretos Ambientales.....	65
4.1.4 Otras Leyes, Reglamentos y Acuerdos.....	67
4.2 EXPERIENCIA LATINOAMERICANA SOBRE CIERRE DE MINAS .....	69
4.3 CIERRE DE MINA .....	71
4.3.1 Objetivos del cierre de mina.....	73
4.3.2 Escenarios del cierre de mina .....	75
4.3.3 Plan de cierre de mina .....	76
4.4 CAMBIO DE USO DEL TERRITORIO Y USOS POTENCIALES PARA LAS ÁREAS RECUPERADAS. ....	77
4.5 CRITERIOS E INDICADORES BÁSICOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE CIERRE DE MINA.....	78
4.5.1 Estabilidad de Taludes.....	81
4.5.2 Control del proceso erosión-sedimentación .....	89
4.5.3 Prácticas de revegetación .....	114
4.5.4 Preparación del sustrato.....	119
4.6 ASPECTOS SOCIALES .....	122
4.6.1 Impacto del cierre de mina en las comunidades .....	122
4.6.2 Participación de la comunidad en la toma de decisiones .....	126
4.6.3 Prácticas para reducir los impactos de cierre .....	130
<b>CAPÍTULO V. METODOLOGÍA ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b> .....	<b>131</b>
5.1 ETAPA 1. PRELIMINAR DE OFICINA Y CAMPO .....	131
5.1.1 Metodología para planificación del cierre de mina en el CFSI.....	131
5.1.2 Determinación del agotamiento en minas del CFSI.....	133
5.1.3 Encuesta a miembros de la comunidad .....	136
5.2 ETAPA 2. CAMPO .....	139

5.2.1	Observación directa (inspección visual).....	139
5.2.2	Caracterización física de suelos.....	149
5.2.3	Modelado de los cambios topográficos .....	171
5.3	ETAPA 3. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN .....	172
5.3.1	Visualización de los cambios topográficos .....	172
<b>CAPÍTULO VI. PROPUESTA DE PLAN DE CIERRE DE MINA.....</b>		<b>197</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>202</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>210</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>216</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación relativa del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro .....	30
Figura 2.2 Provincias geológicas del Escudo de Guayana.....	33
Figura 2.3 Perfil típico de suelo tipo Ustic Haplohumults.....	37
Figura 2.4 Suelo tipo Ustic Haplohumults.....	37
Figura 2.5 Gramíneas silvestres más comunes .....	38
Figura 2.6 Vegetación baja y rala.....	39
Figura 2.7 Vegetación alta y abundante.....	39
Figura 2.8 Vista aérea de Ciudad Piar en 1953.....	40
Figura 2.9 Vista lateral de la mina San Isidro. Año 2006.....	41
Figura 2.10 Vista mina Los Barrancos. Año 2001.....	42
Figura 2.11 Vista del Cerro San Joaquín, al fondo a la derecha. Año 2006 .....	43
Figura 2.12 Vista de la mina Las Pailas, al fondo. Año 2006.....	44
Figura 3.1 Sección geológica vertical típica mina San Isidro.....	47
Figura 3.2 Sección geológica vertical típica mina Los Barrancos.....	47
Figura 3.3 Sección geológica vertical típica mina Las Pailas.....	48
Figura 3.4 Sección geológica vertical típica mina San Joaquín.....	49
Figuras 3.5 y 3.6 Vistas de taladros de perforación.....	50
Figura 3.7 Carga de barrenos.....	50
Figura 3.8 Vista de una voladura.....	50
Figura 3.9 Mineral cargado por pala.....	50
Figura 3.10 Mineral cargado por cargador.....	51
Figura 3.11 Carga con pala – camión.....	51
Figura 3.12 Carga con cargador – camión.....	51
Figura 3.13 Camión acarreado mineral.....	52
Figura 3.14 Camión cargando vagones.....	52
Figura 3.15 Vista de PTLB.....	52
Figura 3.16 Camión descargando en PTLB.....	52
Figuras 3.17 y 3.18 Vistas de cargador en la estación de carga.....	53
Figura 3.19 Fosa abierta, “Open Pit” .....	54
Figura 3.20 Diseño geométrico del sistema de bancos en CVG-FMO.....	55
Figura 3.21 Depósitos y/o escombreras tipo valle.....	56
Figura 3.22 Diseño geométrico de depósitos y/o escombreras en CVG-FMO.....	57
Figura 3.23 Modelo tridimensional de los depósitos.....	58
Figura 3.24 Diagrama del cono flotante.      Figura 3.25 Vista de las secciones...	59
Figura 4.1 Ciclo de Vida de una Mina y Cierre de Mina.....	73
Figura 4.4 Mecanismo de erosión por acción del viento.....	90
Figura 4.5 Proceso de erosión.....	90
Figura 4.6 Erosión por golpeo de una gota de lluvia.....	91
Figura 4.7 Proceso de erosión laminar.....	92
Figura 4.8 Proceso de formación de surcos y cárcavas.....	93
Figura 4.9 Nomograma para el cálculo del tiempo de concentración.....	103
Figura 4.10 Gráfico para estimación de caudal máximo en el CFSI.....	104

Figura 4.11 Relación del tamaño de grano de la partícula con la velocidad necesaria para su erosión, transporte y sedimentación. ....	106
Figura 4.12 Composición del suelo y edafón.....	115
Figura 4.13 Enfoque tradicional de la consulta a la comunidad. ....	126
Figura 4.14 Enfoque proactivo de consulta a la comunidad. ....	127
Figura 5.1 Metodología para cierre de mina. ....	132
Figura 5.2 Producción y vida útil del CFSI. ....	135
Figura 5.5 Frente de trabajo en cerro San Isidro. ....	140
Figura 5.6 Vista de frente de trabajo en cerro Las Pailas.....	141
Figura 5.7 Vista depósito de MPNC en SI.....	142
Figura 5.8 Vista de ladera sur de la Mina San Isidro.....	143
Figura 5.9 Vista del proceso de erosión en surco en SI. ....	144
Figura 5.10 Vista del proceso de formación de una cárcava en SI. ....	145
Figura 5.11 Vista de una cárcava en SI.....	146
Figura 5.12 Acumulación de sedimentos en el lecho de la quebrada Arasiama. ....	147
Figura 5.13 Vista de la quebrada Arasiama desde la ladera sur de LB.....	147
Figura 5.14 Vista de dique en la ladera sur de LB.....	148
Figura 5.15 Vista de la ladera sur de LB.....	149
Figura 5.16 Vista de la ladera sur de LB.....	149
Figura 5.17 Tomando muestras en Cerro San Isidro (SI). ....	150
Figura 5.18 Uno de los sitios de muestreo en Los Barrancos (LB). ....	150
Figura 5.19 Curvas granulométricas. Muestras SI. Tamizado seco.....	152
Figura 5.20 Curvas granulométrica. Muestras LB. Tamizado seco.....	153
Figura 5.21 Curvas granulométricas. Muestras LP. Tamizado seco.....	155
Figura 5.22 Curvas granulométricas Muestras SI. Tamizado húmedo. ....	156
Figura 5.23 Curvas granulométricas muestras LB. Tamizado húmedo.....	157
Figura 5.24 Curvas granulométricas. Muestras LP. Tamizado húmedo. ....	158
Figura 5.25 Curvas granulométricas de ensayo de hidrómetro. Muestras en SI.....	159
Figura 5.26 Curvas granulométricas de ensayo de hidrómetro. Muestras en LB. ....	160
Figura 5.27 Curvas granulométricas de ensayo de hidrómetro. Muestras en LP.....	161
Figura 5.28 Medición con hidrómetro .....	162
Figura 5.29 Comparación entre análisis por tamizado por vía seca y con lavado. Muestras SI .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5.30 Comparación entre análisis por tamizado por vía seca y con lavado. Muestras LB.....	163
Figura 5.31 Comparación entre análisis por tamizado por vía seca y con lavado. Muestras LP. ....	164
Figura 5.32 Picnómetros con muestras en cámara de vacío.....	165
Figura 5.33 Realización de ensayo de azul de metileno. ....	167
Figura 5.34 Respuestas de las muestras de LB al azul de metileno.....	168
Figura 5.35 Respuestas de las muestras de SI al azul de metileno. ....	168
Figura 5.36 Respuesta de la muestra de LP al azul de metileno.....	169
Figura 5.37 Correlación entre tamaño de partícula y velocidad. ....	170
Figura 5.38 Modelado con el software Medsystem, en la oficina de Planificación y Desarrollo de Mina en Ciudad Piar. ....	172

Figura 5.39 Topografía Original de la mina San Isidro .....	174
Figura 5.40 Mina San Isidro - año 2006. ....	175
Figura 5.41 Mina San Isidro - año 2011 .....	176
Figura 5.42 Mina San Isidro – 2016 .....	177
Figura 5.43 Mina San Isidro - año 2021 .....	177
Figura 5.44 Mina San Isidro - año 2026. ....	178
Figura 5.45 Mina San Isidro –Agotada. ....	179
Figura 5.46 Topografía original de la mina Los Barrancos. ....	180
Figura 5.47 Mina Los Barrancos - año 2006.....	181
Figura 5.48 Mina Los Barrancos - año 2011.....	182
Figura 5.49 Mina Los Barrancos - año 2016.....	183
Figura 5.50 Mina Los Barrancos - año 2021.....	184
Figura 5.51 Mina Los Barrancos - año 2026.....	184
Figura 5.52 Mina Los Barrancos – Agotada .....	185
Figura 5.53 Topografía original de la mina Las Pailas. ....	186
Figura 5.54 Mina Las Pailas - año 2006. ....	187
Figura 5.55 Mina Las Pailas - año 2011. ....	188
Figura 5.56 Mina Las Pailas - año 2016. ....	188
Figura 5.57 Mina Las Pailas - año 2020 –Agotado.....	189
Figura 5.58 Topografía original de la mina San Joaquín. ....	190
Figura 5.59 Mina San Joaquín - año 2011. ....	191
Figura 5.60 Mina San Joaquín - año 2016. ....	191
Figura 5.61 Mina San Joaquín - año 2021. ....	192
Figura 5.62 Mina San Joaquín - año 2026. ....	193
Figura 5.63 Mina San Joaquín - Agotada. ....	194

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Reservas Geológicas Oficiales.....	35
Tabla 2.2 Nombres vulgares y científicos de algunas especies de animales registradas en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro.....	40
Tabla 3.1 Reservas recuperables de alto tenor.....	59
Tabla 3.2 Reservas recuperables de alto tenor, más cuarcita friable y finos muy silíceos (FPC).....	60
Tabla 4.1 Valores de M para diferentes coberturas superficiales.....	102
Tabla 4.2 Valores de C según propiedades del terreno.....	103
Tabla 4.3 Número de Manning, según el tipo de revestimiento.....	106
Tabla 4.4 Espaciamiento medio entre diques.....	108
Tabla 4.5 Materiales para control de erosión.....	112
Tabla 5.1 Agotamiento del CFSI.....	134
Tabla 5.2 Estimación de la vida útil de las minas del CFSI.....	135
Tabla 5.3 Resultados de la encuesta aplicada a la comunidad en el CFSI.....	137
Tabla 5.4 Resultados de clasificación de suelos. Muestras SI. Tamizado seco.....	151
Tabla 5.5 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LB. Tamizado seco.....	153
Tabla 5.6 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LP. Tamizado seco.....	154
Tabla 5.7 Resultados de clasificación de suelos. Muestras SI. Tamizado húmedo.....	156
Tabla 5.8 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LB. Tamizado húmedo.....	157
Tabla 5.9 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LP. Tamizado húmedo.....	158
Tabla 5.10 Resultados de clasificación de suelos. Muestras en SI. Hidrómetro.....	159
Tabla 5.11 Resultados de clasificación de suelos. Muestras en LB. Hidrómetro.....	160
Tabla 5.12 Resultados de clasificación de suelos. Muestras en LP. Hidrómetro.....	161
Tabla 5.13 Valores utilizados para determinación de peso específico (G).....	166
Tabla 5.14 Resultados de los ensayos de peso específico (G).....	166
Tabla 5.15 Resultados de ensayo - Azul de metileno.....	169

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tipos litológicos de menas de hierro.....	217
Anexo 2. Clasificación unificada de suelos.....	218
Anexo 3. Tipos de rotura en taludes.....	219
Anexo 4. Ensayo de azul de metileno.....	222
Plano n° 1. Sitios de muestreo de suelos.....	225

## *INTRODUCCIÓN*

El presente trabajo tiene como objetivo proponer un plan de cierre progresivo de mina, en las minas o cerros del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro (CFSI), operados por la empresa C.V.G. Ferrominera Orinoco C.A.

En el capítulo I se presentan aspectos relacionados con el planteamiento de la investigación, en lo que tiene que ver con: definición de objetivos, antecedentes, población, muestra, limitaciones y diseño metodológico de la investigación.

En el capítulo II se describen los aspectos físicos naturales que caracterizan al CFSI, su clima, viento, hidrología, geología regional y local, así como la génesis de los yacimientos, el tipo de suelo generado en esta zona, vegetación, fauna, además de su demografía. También se describen las características especiales de cada mina en particular, todo esto para conocer el área de estudio y poder emitir opinión sobre las afectaciones producidas por la actividad extractiva del mineral del hierro. Así mismo en el siguiente capítulo se sigue describiendo el CFSI, pero ahora desde su parte operativa, se detalla la geología económica y las operaciones básicas de minería realizadas por la operadora. También se presenta el diseño geométrico de bancos y escombras, todo esto conjuntamente con datos de sus reservas de mineral de hierro y la gestión ambiental aplicada a los yacimientos.

El capítulo IV se refiere a la parte teórica de esta investigación, en ella se muestran los conceptos y criterios que deben ser aplicados al planificar un cierre de mina, estos son: estabilidad de taludes, control del proceso erosión sedimentación, revegetación y los efectos sociales que tiene cerrar una mina. Se revisa la legislación nacional ambiental vigente y se comparan las regulaciones que poseen otros países de América Latina.

En el capítulo V, se describe la metodología y a su vez se realiza el análisis y discusión de resultados. Se presenta el desarrollo de la investigación por etapas: en la primera se recopiló información técnica básica sobre cierre de mina, se realizaron visitas a las minas, se determinó la secuencia de agotamiento de los mismos, además se realizó una encuesta a la comunidad. En la segunda etapa se verificaron los criterios y necesidades para el cierre de estas minas, además de modelar los cambios topográficos hasta su agotamiento recuperar muestras de suelo para caracterización física. En la tercera etapa se realizó la visualización e interpretación de los cambios topográficos y el análisis de la información obtenida.

La propuesta de plan de cierre progresivo de mina se ofrece en el capítulo V, en la misma se presenta un balance de las necesidades presentes y futuras para dar un nuevo uso diferente al minero a las áreas del CFSI, una vez agotadas las reservas de mineral de mena ferrífera.

Finalmente se brindan conclusiones y recomendaciones, generales y específicas, con relación al proceso de cierre de mina y a los criterios de planificación estudiados.

## ***CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN***

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En las últimas décadas el ser humano ha puesto de manifiesto su preocupación por los efectos negativos generados al ambiente en este caso incluye lo ecológico: aire, agua, suelo, biota y lo socio-económico, creando la conciencia ambiental; es decir, se manifiesta la preocupación por los cambios positivos o negativos producidos en el ambiente y su comportamiento a futuro.

La minería es una de las actividades económicas más impactantes del ambiente, sin embargo y a pesar de ello, es posible realizar una gestión sustentable, es decir, conseguir un desarrollo minero adecuado y estable con el ambiente. Cada vez más son los trabajos e investigaciones, que terminan en la generación de metodologías, procesos y técnicas destinadas a mitigar los impactos ambientales.

Un ejemplo de estos procesos es el cierre de mina. Este persigue la protección de la salud humana y el medio ambiente mediante el mantenimiento de la estabilidad física, química y de los factores físicos del entorno, de igual forma un uso beneficioso del territorio una vez que concluyan las operaciones mineras.

En nuestro país la empresa C.V.G Ferrominera Orinoco C.A. (de ahora en adelante CVG-FMO), es la operadora del mineral del hierro y ésta ha comenzado a poner de manifiesto su interés ante el agotamiento de la mena y ha querido incorporar a sus actividades de monitoreo y control ambiental el concepto de Plan de Cierre de Mina. El objetivo es mejorar y tratar de optimizar los procesos asociados a la gestión ambiental y proteger al entorno donde están realizando las operaciones y después del cese de éstas.

Un plan de cierre de mina es un proceso que persigue la protección de la salud humana y la calidad del ambiente mediante el restablecimiento del equilibrio físico,

químico y biológico en las áreas intervenidas, también un uso beneficioso y productivo del territorio una vez que concluyan las operaciones mineras.

El concepto de plan de cierre de mina es nuevo en nuestro país y la bibliografía no reporta antecedentes sobre este tema, sin embargo en otros países del continente con amplia experiencia minera -Chile, Perú-, es un tópico que está inmerso desde la formulación de viabilidad de un proyecto minero y las legislaciones de algunos países contienen leyes o reglamentos concernientes al cierre de mina.

El personal del Departamento de Planificación de Minas de la Gerencia de Minería, ha decidido comenzar a realizar proyectos asociados al cierre del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, compuesto por los cerros San Isidro, Los Barrancos, Las Pailas y San Joaquín, situados en el estado Bolívar a 127 Km al sur de Ciudad Guayana, en el sur de Venezuela.

Los referidos cerros están en explotación y se requiere comenzar a planear el cierre de estos, según sus reservas recuperables, para así, de forma progresiva ir aplicando e incorporando el plan de cierre conjuntamente con el plan de adecuación ambiental que la operadora ejecuta.

De esta forma se requiere evaluar y diagnosticar cada cerro para identificar las necesidades de estabilización de laderas naturales y taludes, de control de erosión y sedimentación, de revegetación y de rehabilitación laboral de comunidades. Estas actividades dependerán o serán función de los objetivos de cierre, componentes de cierre, y de los requerimientos de mantenimiento pos-cierre.

El conocimiento emergente sobre cierre de mina permitirá continuar actualizando la pertinencia, viabilidad y efectividad del plan de cierre propuesto.

## **1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1 Objetivo general**

- ♣ Proponer el plan de cierre progresivo de mina para el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, de C.V.G Ferrominera Orinoco, Edo. Bolívar.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- ♣ Recopilación y revisión bibliográfica de cierre de mina.
- ♣ Revisión del plan de explotación a largo plazo y el plan de gestión ambiental de CVG-FMO
- ♣ Evaluar en campo criterios e indicadores para diseño geométrico de laderas, para control de erosión y contaminación, para recuperación vegetal y para la participación comunitaria.
- ♣ Evaluar en campo la estabilidad de taludes para cada uno de los cerros de explotación.
- ♣ Evaluar en campo los procesos de erosión y sedimentación, en la cuenca hídrica y/o en las subcuencas.
- ♣ Evaluar en campo las condiciones edafológicas de los suelos en el área y la vegetación típica
- ♣ Establecer medidas para garantizar la estabilidad de taludes en los yacimientos.
- ♣ Establecer medidas para control de erosión y sedimentación, en cada subcuenca hídrica.
- ♣ Promover la vinculación y participación de la comunidad en el cierre de mina.
- ♣ Integrar los criterios de cierre al programa de monitoreo y control ambiental realizado en la operadora minera.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El propósito de la investigación es proponer el plan de cierre progresivo de mina para el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, CVG-FMO en el estado Bolívar.

Con esta investigación se reafirman los planteamientos y estrategias de largo plazo que consideren un uso sostenible y sustentable del ambiente físico y humano.

La investigación se justifica a fin de que se pudiera implementar el concepto del cierre mina en las labores de monitoreo y adecuación ambiental en el cuadrilátero, con el beneficio de ir trabajando en función de las actividades que deben ser realizadas al final de la vida útil de la operación minera, cuando se agote el recurso mineral para garantizar un uso posterior. A su vez permitirá incluir a la comunidad de Ciudad Piar como parte integral en el proceso de cierre del cuadrilátero ferrífero.

Con esta investigación se dará el primer paso en la elaboración y actualización de planes de cierre por parte de la operadora minera y ésta pudiera servir como aporte o antecedente para venideras actividades de cierre en otras minas del país.

#### **1.4 ALCANCE E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

Esta investigación pretende proponer un plan de cierre de mina para el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, sin embargo debido a la complejidad y extensión del tema ésta se limitará a dar las directrices generales de lo que puede ser efectivamente, un plan de cierre, trabajando con rangos que posteriormente puedan ser afinados a medida que el cierre de los minas se acerque debido al agotamiento de las reservas minerales.

El plan de cierre de una mina es un trabajo conjunto y coordinado de muchos profesionales que requiere de innumerables recursos que van desde económicos pasando por los técnicos, legales y sociales. Es por esto que esta investigación pretende generar un plan cierre conceptual general que permita ser desarrollado a futuro y en detalle por varios investigadores.

La importancia de esta investigación se sustenta en que, en nuestro país el interés por la protección ambiental por parte de las operadoras mineras está en desarrollo, cada vez más son las actividades que estas llevan a cabo para proteger el entorno físico y

humano con fines de mantener las características de los mismos mientras dure la actividad minera. Bajo ese enfoque se ha trabajado en años anteriores, sin embargo se ha puesto de manifiesto no sólo el interés de proteger y mantener el entorno durante las operaciones de una explotación, sino también cuando terminen o cesen las actividades mineras.

Con esta premisa ahora es necesario tener en cuenta las estrategias de protección ambiental, a largo plazo que permitan el desarrollo sustentable y sostenible en el tiempo, para asegurar que, una vez que terminen las actividades mineras en una zona esta pueda cambiar de uso, es decir, realizar una actividad diferente a la minería con el beneficio económico y social para las comunidades aledañas a la zona.

Por medio de esta investigación la empresa CVG-FMO da el primer paso para integrar a sus estrategias de control y monitoreo ambiental a largo plazo, el concepto de plan de cierre de mina lo que le permite ir trabajando de manera progresiva en la implantación de correctivos ambientales a medida que se van agotando los cerros del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro.

## **1.5 MARCO TEÓRICO**

### **1.5.1 Antecedentes**

En Venezuela no existen antecedentes en plan de cierre de mina en yacimientos ferríferos, sin embargo en la zona de estudio existen algunas experiencias que pueden servir de apoyo a este trabajo, estos son:

- ♣ *Autor: Pinilla Karlo (1999). Título: Alternativas para el manejo y disposición de minerales no conformes en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, estado Bolívar C.V.G Ferrominera Orinoco C.A. Tesis de grado.*

Propone un diseño para la construcción de depósitos y escombreras y presenta alternativas para su ubicación en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, con la finalidad de almacenar los minerales de hierro fuera de especificaciones o No conformes, los

cuales no podían ser utilizados de forma inmediata en la elaboración de productos comercializados. Esta investigación permite conocer las metodologías utilizadas para proponer soluciones geotécnicas y ambientales de laderas naturales y artificiales en el CFSI.

- ♣ *Autor: Piña Aurora (2002). Título: Indicadores de sustentabilidad en la toma de decisiones para creación de distritos mineros, aplicados a la minería metálica: Au y Fe, en el estado Bolívar. Tesis de grado.*

Pretende evaluar la incorporación de indicadores de sustentabilidad en la toma de decisiones para crear distritos mineros, con el objetivo de lograr la interacción de las actividades de aprovechamiento de los recursos minerales explotables con los recursos socio-biológicos a ser protegidos. Este trabajo esta a tomo con el objetivo de esta investigación ya que ayuda a implementar el concepto de sustentabilidad en la actividad minera.

- ♣ *Autor: Gill, J. (2003). Diagnóstico y Control de la Erosión Hídrica en Taludes en las Laderas Norte y Sur del Yacimiento San Isidro. Tesis de grado.*

Realiza un diagnóstico y propone medidas correctivas y preventivas del proceso erosivo y sus efectos en taludes y terrazas de las laderas norte y sur del yacimiento San Isidro. Esta investigación sirve de apoyo ya que estudia la erosión en una zona del área de estudio.

- ♣ *Autor: Infante, Yohani (2003). Caracterización de los Sedimentos de la Quebrada Arasiama, al sur del Cerro los Barrancos (Cuadrilátero Ferrífero). Tesis de grado.*

Realiza la caracterización de los sedimentos de la quebrada Arasiama y de los sedimentos de la ladera sur del cerro los barrancos, para facilitar el diseño, operación y mantenimiento de obras hidráulicas.

### **1.5.2 Tipo de investigación**

La investigación se asumirá desde tres tipos, así que será muy variada, debido a la naturaleza y estilo del problema planteado.

Una de ellas es la “*documental*”, ya que se alimentara de información procedente de tesis, trabajos especiales, publicaciones como revistas técnicas especializadas, manuales técnicos, también utilizara recursos como las páginas web. Esto nos permitirá determinar de manera cualitativa los criterios para planificar el cierre de las minas que componen el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro.

El otro tipo de investigación aplicado a este trabajo es la “*descriptiva*” ya que una vez recabada la información, de cuáles son los criterios ambientales, técnicos y sociales, estos deben ser descritos para su comprensión y posteriormente serán puestos en práctica mediante herramientas matemáticas.

Todos los resultados obtenidos de estos cálculos permitirán evaluar de una manera cuantitativa, aquellos escenarios que así lo requieran, dándole así el enfoque cuantitativo que la investigación requiere.

También una parte de la investigación será “*de campo*” ya que esta investigación necesitara nutrirse de datos que no están registrados, ni documentados, por que se necesitara estudiar una parte que tiene que ver con la comunidad aledaña al proyecto minero.

### **1.5.3 Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación corresponde a la estrategia que se adoptara para dar respuesta al problema planteado. El diseño de esta investigación será “*no experimental*”, ya que no se requiere probar alguna hipótesis y el investigador no tiene control sobre ninguna variable del problema.

En este sentido la investigación no experimental será longitudinal descriptiva, porque se propondrá el plan de cierre de mina para el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro y en este se tienen que describir una serie de fenómenos que deben ser descritos y explicados a detalle para poder estructurar y finalmente determinar el plan de cierre requerido.

#### **1.5.4 Población y muestra**

El término de población se utiliza cuando se hace referencia de todos los sucesos elementos posibles en un problema dado. En realidad este término se utiliza para designar el conjunto o suceso.

La población estudiada en este caso son los planes de cierre de mina, vinculados directamente con el desarrollo de la vida de una mina o un proyecto minero.

Las muestras constituyen la selección de elementos, modo de un producto o especie, diseñado con el fin de mostrar a escala las características de dicho producto. Esta definición es válida, ya que una muestra no es más que, una parte representativa de la población.

La muestra será entonces el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, compuesto por los criterios y medidas necesarios para garantizar un cierre exitoso, que permita mitigar los impactos ambientales generados por la actividad minera en esa localidad luego del cese de las operaciones.

En este caso la muestra no depende de alguna selección probabilística, y se presenta como una muestra de juicio ya que se selecciona los sujetos que son representativos. También por conveniencia porque son posibles de medir.

### **1.5.5 Técnicas e instrumentos en la recolección de los datos**

Para esta investigación, la técnica que se empleará será, en principio la de recopilación de información, pertinente a criterios y medidas necesarios para asegurar la estabilidad física, y la seguridad humana dentro y fuera de las instalaciones mineras. Obtenida mediante las visitas a los organismos pertinentes, recopilación de las páginas web, revistas, libros técnicos especializados, tesis de grado, artículos, etc.

Todo esto en la primera fase de la investigación en la que se requiere alimentar la parte teórica de la investigación.

Para la parte de trabajo de campo se realizara la visita periódica programada a cada uno de los yacimientos a los que se requiere planificar el cierre para establecer, mediante observación directa los elementos necesarios para planificar el cierre.

También se hará la revisión en los archivos de C.V.G Ferrominera Orinoco C.A de los trabajos y datos que tengan que ver con programas de mitigación y control ambiental, asociados a un cierre de mina.

Para abordar el entorno social como parte integral de un cierre de mina se utilizara la técnica de entrevista a través de cuestionario, con el objeto de indagar como puede integrarse la comunidad a las actividades de cierre y planificar el uso posterior del espacio.

Todas estas técnicas e instrumentos serán aplicadas a medida que se desarrolle la investigación.

### **1.5.6 Análisis de los datos**

El análisis de los datos son los diferentes modos o maneras, con las cuales se analizaran los resultados obtenidos producto de las técnicas e instrumento puestos en prácticas.

Como investigación se asume de tres tipos, el análisis de los datos se hará a medida que se desarrolle la investigación.

En la parte de investigación “documental” se revisan los datos, que permiten establecer los elementos necesarios para planificar el cierre del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, mediante la comparación con otras experiencias de características similares. En este análisis estará presente la iniciativa y subjetividad ya que depende del investigador y de sus particularidades la inclusión o no de algún elemento.

En la investigación “descriptiva” se realizara el análisis de los elementos seleccionados en la parte anterior, mediante el apoyo de las herramientas matemáticas y programas de computación, teniendo en cuenta que se pretende realizar un plan de cierre de mina.

Los datos que vendrán de la investigación “de campo” producto del cuestionario que será aplicada en todos los niveles de la comunidad, se le aplicara un análisis sencillo estadístico, con una herramienta matemática, que permita visualizar las opiniones de los encuestados. Estas opiniones serán tomadas en cuenta para proponer al final de la investigación un uso futuro de la explotación que pueda ser fuente de otros trabajos de investigación.

## ***CAPÍTULO II. ASPECTOS FÍSICO – NATURALES DEL CUADRILÁTERO FERRÍFERO SAN ISIDRO***

### **2.1 LOCALIZACIÓN Y ACCESO**

El Cuadrilátero Ferrífero San Isidro (de aquí en adelante CFSI) se ubica al norte del estado Bolívar, en el municipio Raúl Leoni, al sur-este del poblado de Ciudad Piar, con una latitud de 7°25' norte y longitud de 63°10' oeste (ver figura 2.1)

A los mismos se puede llegar por una vía que comunica a Ciudad Piar con Santa Bárbara, a una distancia aproximada de 12 km; con Ciudad Guayana –Puerto Ordaz y San Feliz- se encuentra a una distancia de 140 km y con Ciudad Bolívar a unos 115 km.

También a 1,5 km de Ciudad Piar se encuentra una pista de aterrizaje, y los yacimientos poseen una línea férrea de 136 km de longitud que se extiende desde el Cerro Bolívar y el CFSI hasta Puerto Ordaz, dicha línea es utilizada para el transporte exclusivo del mineral de hierro, hasta la planta de procesamiento mineral (PMH) en Puerto Ordaz desde donde se despacha hacia sus diferentes destinos.

Internamente los yacimientos se comunican través de carreteras engranzonadas, a los diferentes frentes de explotación. Al ingresar a los yacimientos el primero que se encuentra es San Isidro, luego se ubica Las Pailas, al norte San Joaquín y finalmente, Los Barrancos al este.

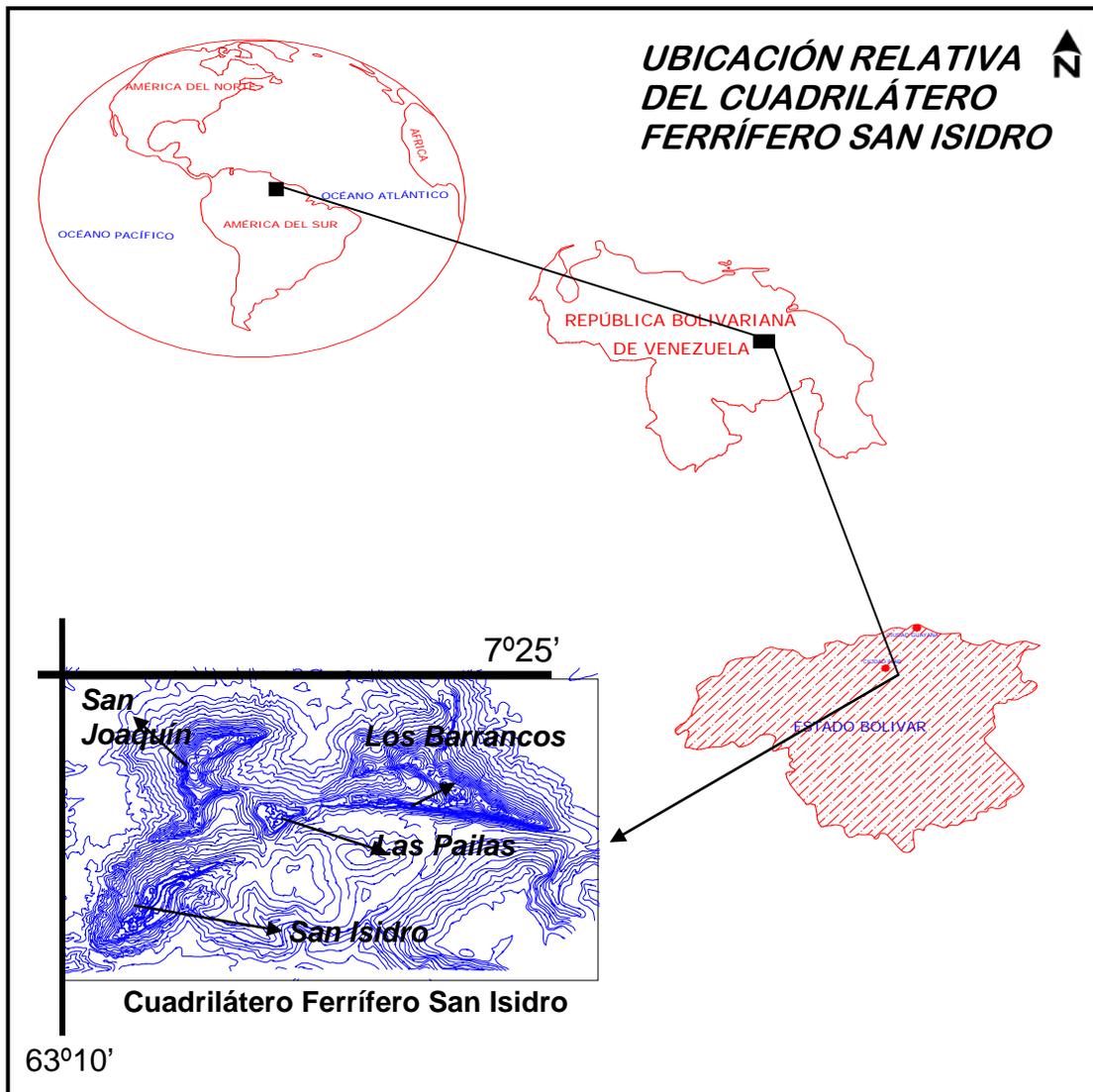


Figura 2.1 Ubicación relativa del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro  
Fuente: Elaboración Propia

## 2.2 CLIMA

En general el clima de la zona es tropical húmedo, la temperatura media es de 28,7 °C, con máximo de 33 °C, y mínimo de 18,2 °C. Los meses de precipitación son entre mayo y octubre con mayor torrencial en julio y agosto, el clima para febrero y mayo es semiárido, la pluviosidad medida es de 1905 mm /año. CVG-EDELCA (2001)

La humedad relativa promedio es de 74%, y la evaporación promedio es de 2.238,3 mm, los meses con evaporación más alta (marzo y abril) coinciden con los meses de mayor temperatura.

La insolación presenta un promedio anual aproximadamente de 225 horas de sol al año y la radiación media un promedio anual de aproximadamente 10,978 cal/cm<sup>2</sup>. Anualmente la evaporación alcanza valores de 2.614 mm aproximadamente.

### **2.3 VIENTOS**

Según informes técnicos de (CVG-TECMIN 1991, en Gil 2003) los vientos dominantes en la zona son los alisios, registrándose con una velocidad media anual de 10,59 Km/h aproximadamente con una dirección prevaleciente este y oeste – sur oeste, sin embargo este comportamiento no es en toda el área ya que la presencia del lago de Guri ocasiona un cierto efecto local (brisas- lago – tierra –lago) que influye notablemente en el cambio de dirección y velocidad del viento en las cercanías del mismo.

### **2.4 HIDROLOGÍA**

Desde el punto de vista hidrológico el CFSI pertenece a la cuenca del río Caroní, es decir, la hoya del Orinoco. Los yacimientos que componen el cuadrilátero, a su vez están inmersos dentro de otras cuencas menores o subcuencas.

El cerro San Isidro pertenece a la subcuenca de la quebrada La Puertica, la cual es afluente por la margen izquierda del río Santa Bárbara, que a su vez desemboca por la margen izquierda a la parte baja del río Caroní. En esta la mayoría de los cuerpos de agua son intermitentes aunque las quebradas, La Puertica, San Isidro, El Cañito y Aguas Calientes son de régimen permanente. La quebrada La Puertica fluye con un rumbo sureste, hasta su confluencia con el río Santa Bárbara

Por su parte el cerro Los Barrancos forma parte de la subcuenca de la quebrada Arasiama, que fluye en sentido oeste-este, hasta su confluencia con el río Arasiama

aguas abajo, este a su vez desemboca en el embalse de Guri. Existe un número significativo de quebradas de régimen intermitente, pero la cartografía no reporta su nombre. El patrón de drenaje responde al tipo dendrítico.

El cerro San Joaquín pertenece a la subcuenca de la quebrada Mereicito, la cual es afluente por la margen izquierda del río Tocoma, que a su vez desemboca en el río Claro por su margen derecha al norte, en el embalse de Guri. La quebrada Mereicito fluye en sentido noreste. El patrón de drenaje es dendrítico.

Las cabeceras de los cursos de agua se encuentran por lo regular por debajo de la formación de hierro, generalmente en el contacto de la roca mineralizada, gneis, esquistos y lateritas.

Existen abundantes cabeceras de agua en las laderas occidentales de San Joaquín, las meridionales de Los Barrancos y San Isidro. Existen también dos fuentes termales situadas en los lados oeste y este del cerro Aguas Calientes (motivo por el cual recibe su nombre).

## **2.5 GEOLOGÍA**

### **2.5.1 Geología regional y local**

Según Mendoza (2000) el Escudo de Guayana está formado por rocas de edad Precámbrica, siendo éstas las más antiguas, lo cual caracteriza al escudo por ser muy estable y no estar sujeto a cambios bruscos. Esta provincia fisiográfica constituye el 45% de la superficie territorial total (423.000 km<sup>2</sup>) y es la región minera por excelencia, con reservas auríferas, diamantíferas y grandes reservas de hierro.

El escudo se originó durante movimientos tectónicos en el Precámbrico; durante el Cámbrico fue cubierto por el mar y las dos extensas regiones del Brasil y Guayana permanecieron como islas divididas por la faja del Amazonas. En Venezuela, el escudo ha sido dividido, con base en caracteres petrográficos y tectónicos, en cuatro provincias: Imataca, Cuchivero, Pastora y Roraima (ver figura 2.2).

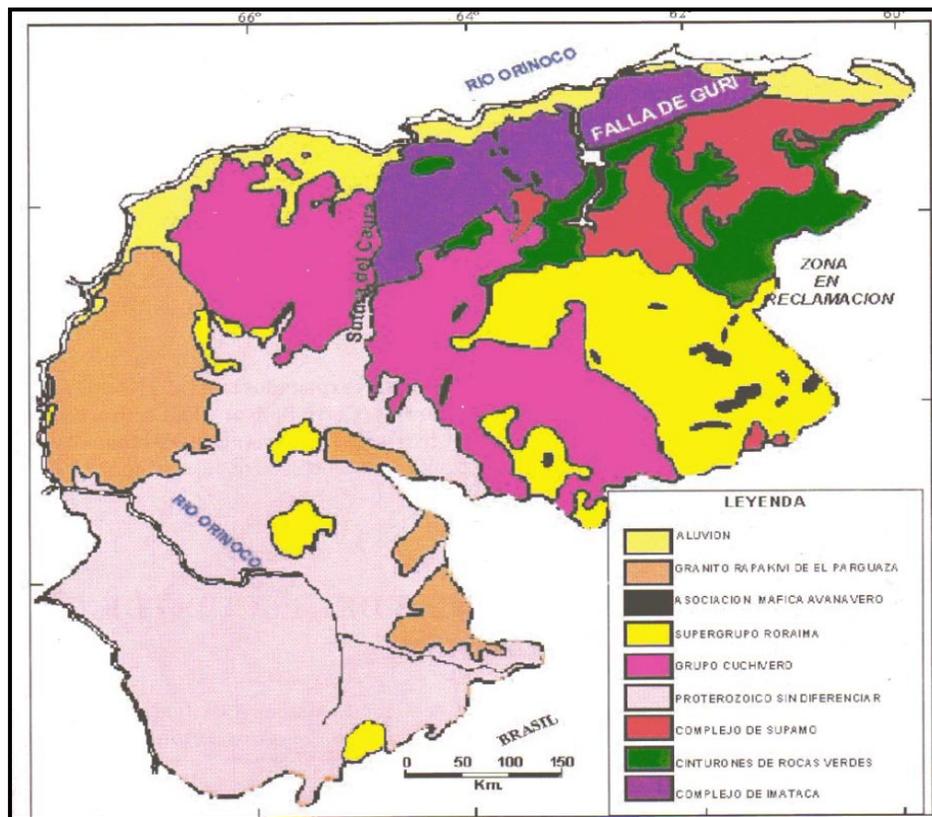


Figura 2.2. Provincias geológicas del Escudo de Guayana  
Fuente: Mendoza (2000).

La columna estratigráfica del Escudo de Guayana comienza con el granito gnésico del Arqueano (Precámbrico Inferior) cubierto discordantemente por metasedimentos de la era Algonkiana (Precámbrico Superior). Las rocas Precámbricas más antiguas son metamórficas, de alto grado, parcialmente migmáticas, representadas por paraneises, esquistos, gneises graníticos, esquistos anfibólicos y anfibolitas, intrusionadas por granodioritas y rocas migmáticas básicas completamente deformadas.

La geología local del CFSI está caracterizada por la Provincia de Imataca, y las rocas dentro de ella han sido denominadas Complejo de Imataca. Estas rocas afloran en la parte norte del estado Bolívar, al este del río Caura y paralelamente al río Orinoco hasta penetrar en el estado Delta Amacuro y representan, hasta la fecha, las rocas más antiguas; con una edad comprendida entre 3.500 – 3.600 m.a.

La litología característica del Complejo de Imataca son gneises félsicos y máficos intercalados con capas de cuarcitas y cuarcitas ferruginosas, granulitas, esquistos anfibolíticos, anfibolitas, mármoles dolomíticos y areniscas cuarzosas; existen además intrusiones de rocas granitoides, básicas, diques, *sills* de diabasa, vetas de pegmatita, aplita y cuarzo.

Las tendencias estructurales que dominan la región son N 60°-70° E, más o menos paralelas a la Falla de Gurí. Registra seis o más dominios tectónicos, separados entre sí por grandes fallas mayores del tipo corrimiento. El plegamiento que presentan es isoclinal, con repliegamientos más abiertos. En la parte Norte, los pliegues tienen rumbo NW mientras que la parte sur la tendencia dominante de los pliegues es N 70°-80° E.

### **2.5.2 Génesis de los yacimientos**

Las menas de hierro del distrito ferrífero de Piar se originaron a partir de las cuarcitas ferruginosas de Imataca por enriquecimiento supergénico. El proceso que genera las menas es la remoción por meteorización de la sílice y el silicato de las cuarcitas ferruginosas con la consiguiente concentración residual de óxidos e hidróxidos de hierro (Martin 1976, en Gill 2003)

Una vez establecidas las rocas cuarcíticas, unos miles de años después, estas comenzaron a descomponerse con la humedad y el clima tropical. La magnetita se transformó a hematita, martita y otros óxidos de hierro, que interestratificados entre las bandas de cuarcita, comenzaron a sufrir cambios físico-químicos. Se inició también la descomposición de sílice, principal aglutinante y cemento original, más vulnerable a las condiciones ambientales, la cual, al disolverse comenzó a circular por las fisuras y fue a ocupar cavidades inferiores por percolación. Los minerales de ganga como piroxenos y anfíboles son reemplazados por goetita, dando como resultado menas esencialmente hematíticas-goetíticas-martíticas.

Por su parte el hierro poco a poco fue ocupando los espacios vacíos dejados por la sílice al ser lixiviado. Como la solubilidad de la sílice y su remoción era más o menos completa, la porosidad era directamente proporcional a aquella. El resultado final fue la concentración de enormes masas de finos desmenuzables que no fueron arrastrados a otros sitios, donde se hubieran dispersado, de no ser por la formación de una costra o caparazón muy duro formado por diversos óxidos hidratados que fueron cementando a los otros óxidos en la superficie, donde las condiciones atmosféricas eran favorables.

### 2.5.3 Reservas geológicas

Las reservas geológicas del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro de CVG-FMO, se pueden observar en la tabla 2.1

*Tabla 2.1 Reservas Geológicas Oficiales*

MINA	PROBADAS				PROBABLES			
	ALTO TENOR		BAJO TENOR		ALTO TENOR		BAJO TENOR	
	Mt.	% Fe						
SAN ISIDRO	127.45	65.54	89.99	44.02	41.09	64.03	139.03	42.16
LOS BARRANCOS	330.60	64.64	128.03	44.91	202.80	64.56	312.22	43.96
LAS PAILAS	29.33	63.48	64.27	41.57	6.25	63.98	36.15	41.45
SAN JOAQUÍN	69.09	64.66	27.64	45.33	32.77	64.47	53.53	43.48

Mt = millones de toneladas

Cifras actualizadas a enero del 2007

Fuente: CVG-FMO Jefatura del área de Planificación y Desarrollo de Mina

### 2.6 SUELOS

La caracterización de los suelos en el área del CFSI, está basada en el estudio realizado por CVG-TECMIN (1991); la cual se fundamenta en la clasificación taxonómica de Soil Survey, resultando en: Kanhaplohumults esquelético y Ustorthents muy esquelético, con inclusiones de Kandihumults y Haplustults.

Los suelos Kanhaplohumults esquelético, ocurren generalmente en relieves de vega, comúnmente asociados con moderadas proporciones de afloramientos rocosos. Se caracteriza por exhibir un avanzado desarrollo evolutivo, en su mayoría son suelos

superficiales a moderadamente profundos. Presentan un horizonte A de textura arcillo arenosa en forma predominante y un horizonte B con textura predominantemente arcillosa a franco arcilla arenosa mezclados.

La retención de humedad se ha estimado como baja y la permeabilidad moderada a rápida. Poseen una moderada fertilidad natural en superficie y baja a muy baja en profundidad, su PH es extremadamente ácido a moderadamente ácido.

Los suelos Ustorthents muy esquelético se localizan generalmente en los relieves de vega y sierra, asociados a una alta pedregosidad, se caracterizan por ser de origen residual, con poco o ningún desarrollo pedogenético derivados a partir de rocas metamórficas; en particular: cuarcitas ferruginosas y anfibolitas.

Como consecuencia de la topografía y textura locales, son suelos bien drenados a algo excesivamente drenado y el tipo de erosión es laminar. Su capacidad de uso los ubica en clase VII, cuyo fin es la conservación de la fauna y flora natural y el esparcimiento CVG-TECMIN (1991).

Contreras (2006) clasificó como Ultisoles los suelos desarrollados sobre la provincia geológica de Imataca, de espesores muy variables, entre 100 y 250 cm. Reporta, en su estudio, suelos Ustic Haplohumults, que se caracterizan por poseer un epipedón úmbrico en superficie y un grado de saturación menor al 35% en la parte inferior del horizonte argílico. El perfil y los datos analíticos más importantes se presentan en la figura 2.3 y en la figura 2.4 se muestra una fotografía con el perfil típico. En éste se evidencia un cambio textural brusco y una distribución normal de materia orgánica.

## **2.7 VEGETACIÓN**

De acuerdo con estudios de CVG-TECMIN (1991) en la zona predominan 2 unidades de vegetación: bosques y sabanas.

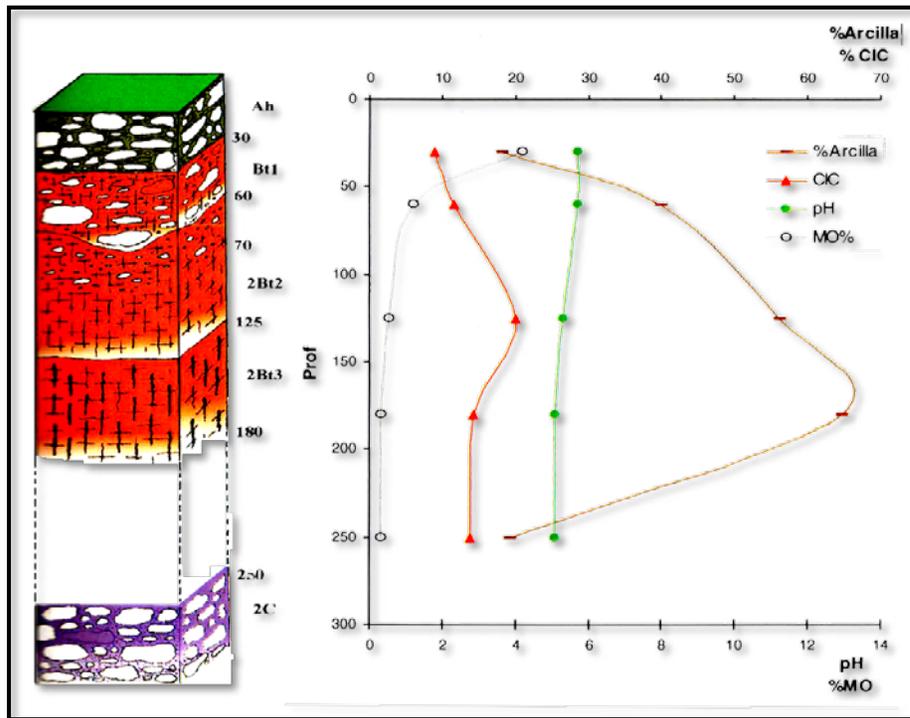


Figura 2.3. Perfil típico de suelo tipo Ustic Haplohumults.  
Fuente: Contreras (2006).



Figura 2.4 Suelo tipo Ustic Haplohumults  
Fuente: Contreras (2006).

Los bosques se definen por la presencia de formaciones semidecíduas, de altura media y cobertura rala, con dos estratos arbóreos diferenciándose de las demás formaciones de este paisaje por el predominio de las especies nativas de gramíneas y leguminosas. Entre las gramíneas en la figura 2.5, se pueden observar algunos de los géneros de gramíneas silvestres más comunes. Dentro de ellas destacan (de izquierda a derecha): Los Caracolillos (*Dactylis glomerata*), la hierba Timotea (*Phleum pratense*), Carrizo (*Phragmites communis*), la Espiguilla (*Poa pratensis*), el Césped (*Cynodon dactylon*), todas ellas fácilmente identificables en cunetas, prados, herbazales, ribazos.



Figura 2.5. Gramíneas silvestres más comunes  
Fuente: Sanabria y Fariñas (1990).

Y entre las leguminosas destacan: “Caujera (*Cyperus inzulay*, *Bulbostylis capillaris*); Haba (*Cannavalia phaseolus*); Cola de Zorro (*Adropogon bicornis*); Gamelote (*Xiris laxifolia*, *Panicum maximun*)”.

Las sabanas se caracterizan por formaciones herbáceas de tipo llanero, dominado por un estrato herbáceo denso a ralo. Sus especies dominantes son: *Trachypogan plumosas*, *Axonopus sp*, con elementos arbustivos tales como: *Curatela americana*, *Bowdicha vigiloide*.

En las zonas donde aflora la mena de hierro la vegetación presente es muy baja y rala (figura 2.6), mientras que en los suelos lateríticos o los formados por rocas básicas y ácidas la vegetación es alta y abundante (figura 2.7)



Figura 2.6. Vegetación baja y rala    Figura 2.7. Vegetación alta y abundante  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del área de Planificación y Desarrollo de Mina

Guevara (2005) realizó un inventario de la vegetación en la vertiente sur de la ladera del cerro Los Barrancos. La autora identificó 51 especies, en 30 familias presentes en suelos pedregosos, ácidos ( $\text{pH} < 4,5$ ) con altas concentraciones de hierro y magnesio.

Las especies más importantes identificadas en las comunidades arbustivas fueron: *Pterandra sericea*, *Myrcia citrifolia*, *Banara nitida*, *Mimosa microcephala*, *Jacaranda obtusifolia*, *Clusia rosea* y *Lippia organoides*. En las comunidades herbáceas fueron: *Borreria verticillata*, *Paspalum millegrana*, *Ouratea roraimae*, *Cyperus odoratus*, *Trachypogon plumosus* y *Xyris fallax*. La mayoría de las especies colonizadoras son típicas de comunidades asociadas a afloramientos rocosos.

## 2.8 FAUNA

La fauna silvestre en la zona del CFSI, reportada por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN, 1995; ahora MINAMB) está indicada en la tabla 2.2.

*Tabla 2.2 Nombres vulgares y científicos de algunas especies de animales registradas en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro*

<b>FAMILIA</b>	<b>NOMBRE VULGAR</b>	<b>NOMBRE CIENTÍFICO</b>
<b>Mamíferos</b>	Rabipelado	<i>Didelphys albiventris</i>
	Murciélago	<i>Noctilio albiventris</i>
	Araguato	<i>Alouatta seniculus</i>
<b>Aves</b>	Caricari	<i>Coragyps atratus</i>
	Gavilán	<i>Falco rufigularis</i>
	Periquito	<i>Aratinga pertinax</i>
<b>Reptiles</b>	Babo Morichalero	<i>Paleosuchus palpebrosus</i>
	Mapanare	<i>Corallus enydris</i>
<b>Anfibios</b>	Rana	<i>Hyla boans</i>

Fuente: (MARN, 1995)

## **2.9 DEMOGRAFÍA**

El centro poblado de mayor influencia en el CFSI es Ciudad Piar, fundado el 9 de febrero de 1952 (ver figura 2.8), para dar asentamiento a los trabajadores que se dedicaban a la explotación de hierro; este es la capital del municipio Raúl Leoni. Posee una población de 30.062 habitantes y representa el 2,5% de la población del estado Bolívar, cuyo número es de 1.214.846 habitantes, según el censo del 2001.



Figura 2.8 Vista aérea de Ciudad Piar en 1953  
Fuente: Revista El Minero, N°1 - año 2004.

El municipio Raúl Leoni fue constituido el 09 de julio de 1986. Posee una extensión de 54.386 Km<sup>2</sup>, lo que lo hace el más grande en extensión geográfica del país. Otras poblaciones próximas al CFSI son: Santa Bárbara y Tocomita.

## **2.10 CUADRILÁTERO FERRÍFERO SAN ISIDRO**

El cuadrilátero ferrífero San Isidro (CFSI) está compuesto por cuatro cerros o yacimientos – San Isidro, Los Barrancos, Las Pailas y San Joaquín- tienen en conjunto una extensión de 5.500 ha. Los mismos se describen a continuación:

### **2.10.1 San Isidro**

El cerro San Isidro (SI), fué descubierto a finales de 1947. El mineral está recargado hacia el sur, de ahí que, en un principio se creía que no tenía reservas suficientes, porque visto desde el norte el contacto de la mena está muy alto, casi en el tope del cerro. Tiene una altura máxima de 710 msnm, unos 410 m sobre el nivel de las sabanas circundantes (Figura 2.9)



Figura 2.9 Vista lateral de la mina San Isidro. Año 2006.  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del área de Planificación y Desarrollo de Mina.

En superficie la mena es bastante uniforme; el área de la zona mineralizada tiene tres (3) km de largo por 600 m de ancho promedio y la profundidad media es de 60 m. Este yacimiento comenzó sus operaciones en 1968.

### **2.10.2 Los Barrancos**

Los Barrancos (LB) es el yacimiento más oriental y el de mayor extensión del CFSI. Su parte sur forma un escarpado (barranco) de falla de unos tres (3) km en dirección este – oeste, con alturas variables entre 30 y 150 m sobre el nivel de las sabanas circunvecinas. (Ver figura 2.10)

Este cerro ha sido dividido en cinco zonas: A, B, C, D y E, debido a su gran extensión y a diferencias estructurales, que pudieran ser sendos cuerpos separados. Así zonas A y C, sobre la base de 148 mediciones, zona B sobre la base de 225 mediciones; en las zonas D y E tiene sentido norte – sur.



Figura 2.10 Vista mina Los Barrancos. Año 2001.  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del área de Planificación y Desarrollo de Mina

Se puede afirmar que el yacimiento Los Barrancos y San Joaquín forman parte de un anticlinal cuya parte central está destruida por fallamiento transversal y el anticlinal tiene doble declive y está deprimido en su parte central de manera que las laderas de Los Barrancos I y II están muy próximas; inició sus actividades en 1990.

### **2.10.3 San Joaquín**

El yacimiento San Joaquín (SJ) proyecta comenzar su producción en el año 2011, presenta el mayor porcentaje de sílice del grupo San Isidro, se encuentra al noroeste de Las Pailas (Figura 2.11)

Forma parte de un anticlinal cuya parte central está destruida por fallamiento transversal, el anticlinal tiene doble declive y está hundido en su parte central, este anticlinal forma un pliegue casi acostado con buzamiento hacia el sur.



Figura 2.11 Vista del Cerro San Joaquín, al fondo a la derecha. Año 2006  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del área de Planificación y Desarrollo de Mina

#### 2.10.4 Las Pailas

El cerro Las Pailas (LP) está situado en el centro de gravedad del CFSI. Su altura máxima es de 700 msnm. Sirve de enlace de todos los yacimientos, su ramal noroeste se prolonga y penetra en San Joaquín y el suroeste penetra en San Isidro (Figura 2.12)

Una de las características especiales del cerro Las Pailas es su potencial hidráulico, tomando en cuenta la diversidad de manantiales de sus cercanías, los cuales alimentan al río Tocomá, quien a su vez desemboca en el Caroní; en su conexión con el cerro San Isidro el cerro Las Pailas posee un manantial de aguas termales, cuya temperatura alcanza los 38°C.

Se configura como una cavidad vertical, redondeada, producida por lixiviación o disolución de la sílice, que va percolando y se dispersa a través de las fracturas o grietas. Cuando este fenómeno se produce en calizas, la cavidad resultante se denomina “delina”; ambas son cavidades verticales de disolución. El cerro es redondeado y es el más pequeño del grupo. Este comenzó sus operaciones en 1992.



Figura 2.12 Vista de la mina Las Pailas, al fondo. Año 2006.  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del área de Planificación y Desarrollo de Mina.

## ***CAPÍTULO III. GENERALIDADES DE C.V.G FERROMINERA ORINOCO C.A.***

### **3.1 C.V.G FERROMINERA ORINOCO C.A.**

Es una empresa del Estado, tutelada por la Corporación Venezolana de Guayana (CVG) y adscrita al Ministerio de Industrias Básicas y Minería (MIBAM) del gobierno de la República Bolivariana de Venezuela.

Inició formalmente sus operaciones en enero de 1976, luego de la nacionalización del hierro el 1 de enero de 1975. Se encuentra distribuida entre Ciudad Piar y Ciudad Guayana (Puerto Ordaz – San Félix). Las operaciones mineras se ejecutan en el distrito ferrífero Piar; el almacenaje, procesamiento y despacho del mineral de hierro y sus derivados en los puertos, Puerto Ordaz y Palúa, ambos ubicados en las riberas de los ríos Caroní y Orinoco. La sede administrativa se encuentran en la vía Caracas, edificio de administración N° 2, Puerto Ordaz, estado Bolívar, código postal 8050, Venezuela.

La capacidad de producción de la empresa está en el orden de 20 Mt al año y cuenta con aproximadamente 4.000 trabajadores.

Las negociaciones de venta del mineral de hierro se realizan en 55% al mercado interno nacional, a clientes como: Sidor, Orinoco Iron, Venprecar, Consigua, Minorca, entre otros, al precio actual de 18 \$/ton. Mientras que el otro 45% se vende al mercado internacional, siendo los principales clientes: Inglaterra, Holanda, España, Bélgica, China, Japón, Alemania, Italia y Bulgaria, a un precio de 40 \$/ton, aproximadamente.

### **3.2 TIPOS LITOLÓGICOS DE MENAS DE HIERRO**

En los yacimientos se distinguen tres tipos principales de litologías: de alto tenor, de bajo tenor y estéril; para mayor detalle revisar el anexo 1. La clasificación de

litologías que se presenta está ajustada a criterios propios de CVG-FMO y son las siguientes:

Menas de alto tenor (hierro mayor a 55 %)

- ♣ Menas Duras o Costra
- ♣ Menas Blandas o Friables (Finos)

Menas de bajo tenor (hierro menor a 55 %)

- ♣ Cuarcita Ferruginosa Friable
- ♣ Cuarcita Ferruginosa

Estéril

- ♣ Laterita
- ♣ Gneis

Basados en datos geológicos de superficie y perforación geoexploratoria, son elaboradas secciones verticales, siendo continuamente chequeadas a medida que progresan los frentes de explotación. Las secciones horizontales (*slices*) son preparadas con base en las secciones verticales y la geología de superficie estructural y litológica.

Las secciones geológicas son de dos tipos: i) secciones verticales, separadas 50m entre sí en Las Pailas y San Joaquín; separadas 50 y 25m en San Isidro; y separadas cada 62,5m en Los Barrancos y ii) secciones horizontales, separadas cada 15 m y preparadas para bancos de producción.

Los cuerpos de mena en el CFSI afloran en la parte superior de las colinas, entre 430 y 800 msnm, siendo casi exclusivamente menas friables, finos con intercalaciones de costras; que pasan transicionalmente a cuarcitas ferruginosas friables, cuarcitas ferruginosas duras, hasta alcanzar las zonas estériles (lateritas).

En las figuras 3.1 al 3.4 es posible apreciar diferentes secciones geológicas verticales típicas de las minas en el CFSI. Es de hacer notar que los colores que representan las

diferentes litologías son las manejadas por la operadora y no corresponden con los colores que deben ser utilizados en las secciones geológicas.

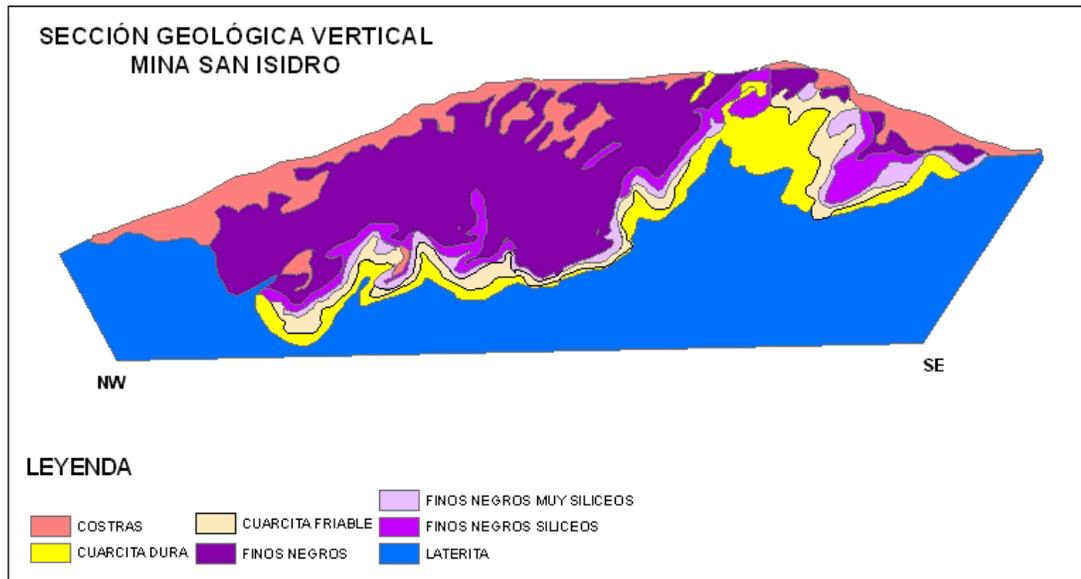


Figura 3.1 Sección geológica vertical típica mina San Isidro.  
Fuente: CVG-FMO - Jefatura del Área de Geología (1998).

En la sección geológica vertical de la mina San Isidro se pueden observar acumulaciones de mena de alto tenor (finos negros), en forma de bolsón, recubiertos por una capa significativa de menas duras (costras).

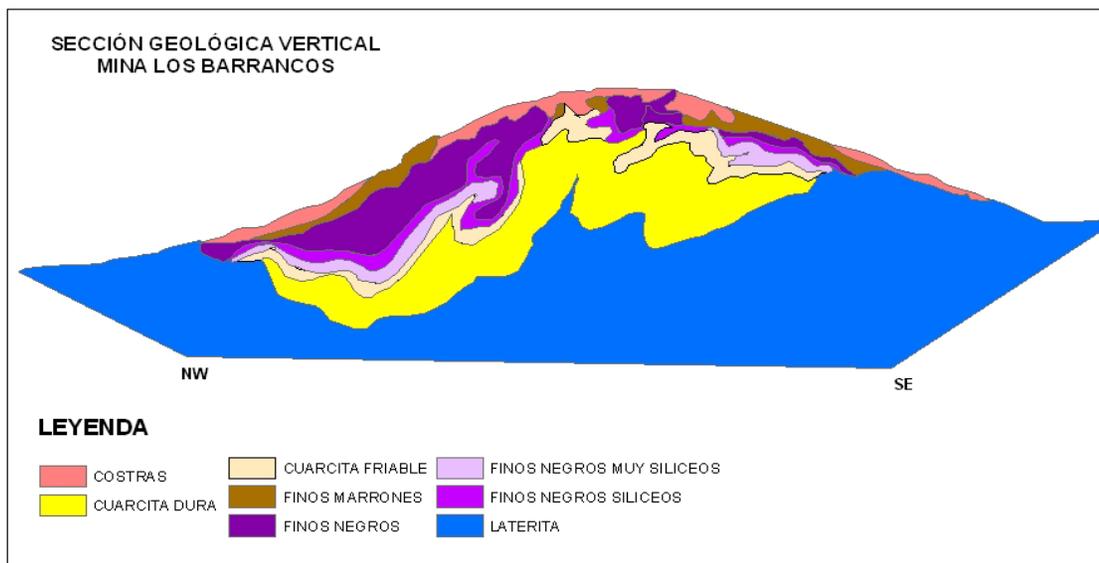


Figura 3.2 Sección geológica vertical típica mina Los Barrancos.  
Fuente: CVG-FMO - Jefatura del Área de Geología (1998).

La sección de la mina Los Barrancos muestra un yacimiento donde la ocurrencia de menas de alto tenor (finos negros) se encuentra intercalada con menas finas marrones, cubiertas por costras, que yacen sobre menas tipo finos negros silíceos y finos negros muy silíceos. Seguidamente se encuentra cuarcita friable, luego cuarcita dura y al final laterita.

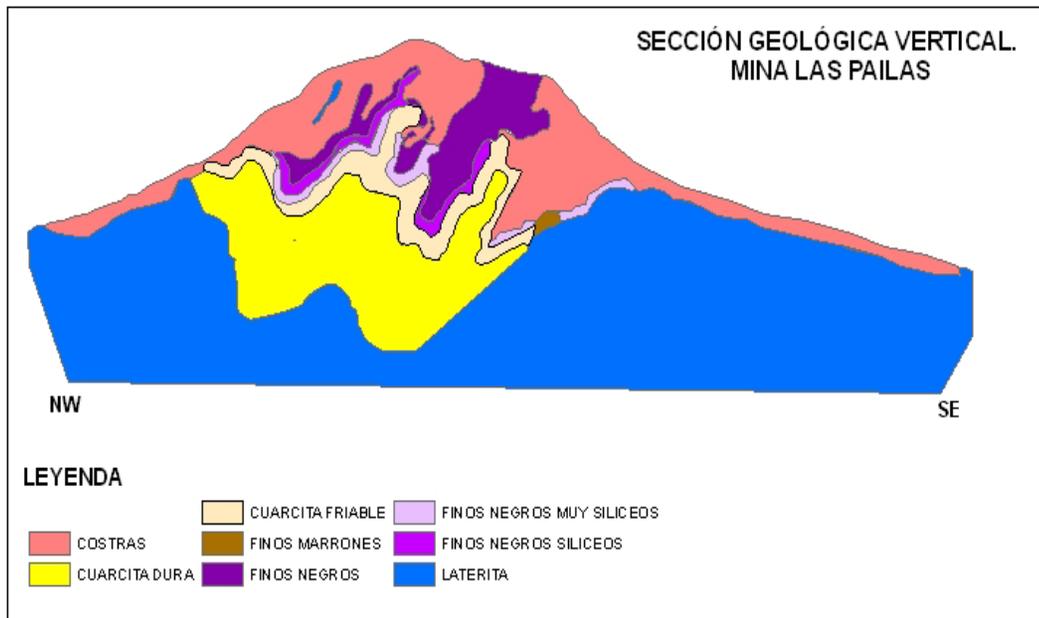


Figura 3.3 Sección geológica vertical típica mina Las Pailas  
Fuente: CVG-FMO - Jefatura del Área de Geología (1998).

En la mina Las Pailas la ocurrencia de costras es preponderante, con intercalaciones de finos negros, que yacen sobre finos negros silíceos y finos negros muy silíceos. La secuencia continúa con cuarcita friable, cuarcita dura y termina en esteril (laterita).

Finalmente la sección geológica vertical de la mina San Joaquín representa la secuencia de tipos litológicos presentes, en los que resaltan las costras, seguidas de cuarcita friable y luego cuarcitas duras, finalizando en laterita.

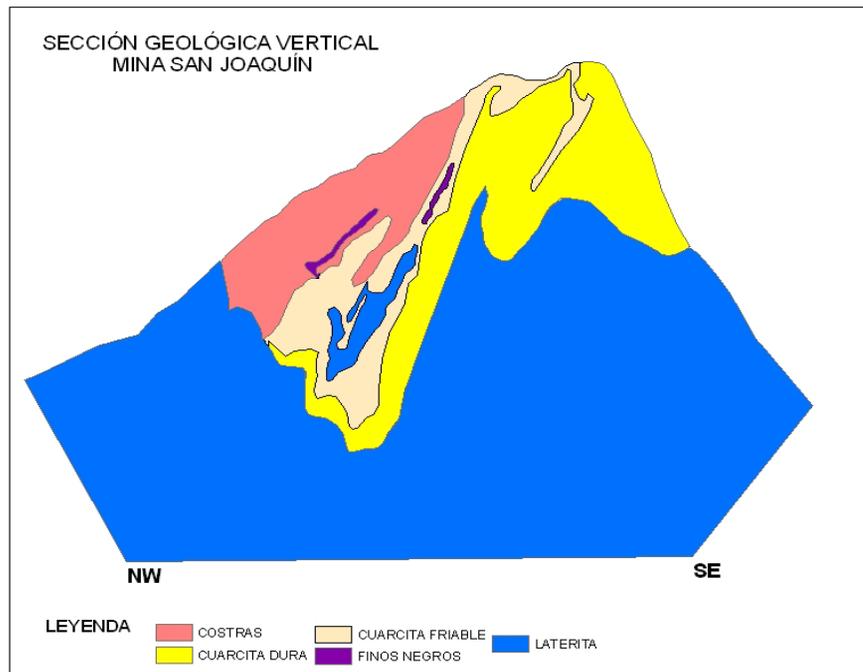


Figura 3.4 Sección geológica vertical típica mina San Joaquín  
Fuente: CVG-FMO - Jefatura del Área de Geología (1998).

### 3.3 OPERACIONES MINERAS

La producción del mineral de hierro se realiza en base a los planes de minas, a largo, mediano y corto plazo, los cuales se elaboran tomando como base la cantidad y calidad de las reservas y la demanda exigida por los clientes. Para la evaluación de recursos, planificación y diseño de la secuencia de excavación en las minas se utilizan sistemas computarizados, actualmente se realiza con el software MedSystem ®. Los procesos involucrados en la explotación del mineral son:

**Exploración:** el paso inicial en la explotación del mineral de hierro consiste en la prospección y exploración de los yacimientos, con el propósito de identificar la cantidad de recursos, así como sus características físicas y químicas.

**Perforación:** esta operación se realiza con taladros eléctricos rotativos (ver figuras 3.5 y 3.6), que perforan huecos con brocas de 12 ¼” de diámetro, a profundidades de 18 m y patrones de perforación para la mena blanda de 12x8 m<sup>2</sup>; mena regular de

12x7 m<sup>2</sup> y/o 9x9 m<sup>2</sup>; para la mena dura de 12x7 m<sup>2</sup> y para la mena muy dura 12x6 m<sup>2</sup> lo que permite bancos efectivos de explotación de 15 m de altura.



Figuras 3.5 y 3.6 Vistas de taladros de perforación.  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.

**Voladura:** se utiliza como explosivo el ANFO, sustancia compuesta por 94% de nitrato de amonio, mezclado con 6% de gasoil y el ANFOAL compuesto por 87% de nitrato de amonio, 3% de gasoil y 10% de aluminio metálico. También se utilizan accesorios como: *booster* o reforzador, cordón detonante, retardadores, mecha de seguridad y fulminante (Ver figuras 3.7 y 3.8).



Figura 3.7 Carga de barrenos.      Figura 3.8 Vista de una voladura.  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.

**Carga:** una vez fracturado el mineral, por efecto de la voladura, es removido por palas eléctricas y cargadores frontales, desde los frentes de producción. Las palas

eléctricas tienen capacidades de: 14yd<sup>3</sup> y de 10yd<sup>3</sup>; Y los cargadores son de: 19yd<sup>3</sup>, 12yd<sup>3</sup> y 6yd<sup>3</sup> (ver figuras 3.9 al 3.12).



Figura 3.9 Mineral cargado por pala.



Figura 3.10 Mineral cargado por cargador.

Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.



Figura 3.11 Carga con pala – camión.



Figura 3.12 Carga con cargador – camión.

Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.

**Acarreo:** el acarreo se realiza con camiones de 90 ton de capacidad (figura 3.13), los cuales se encargan de llevar el mineral para depositarlo directamente en los vagones ubicados en las plataformas o muelles de carga en San Isidro (figura 3.14).



Figura 3.13 Camión acarreado mineral



Figura 3.14 Camión cargando vagones.

Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.

También se realiza con camiones de 170 ton y de 180 ton, los cuales descargan el mineral de hierro, a la planta de trituración Los Barrancos (PTLB) (ver figuras 3.15 y 3.16) o a los muelles y estaciones de carga. Posteriormente los vagones son llenados directamente por los cargadores frontales (ver figuras 3.17 y 3.18).



Figura 3.15 Vista de PTLB.



Figura 3.16 Camión descargando en PTLB.

Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.



Figuras 3.17 y 3.18 Vistas de cargador en la estación de carga.  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.

Los vagones cargados son llevados al patio de ferrocarril, en donde son acoplados para formar trenes de 125 a 140 vagones. Una vez conformados los trenes son arrastrados por locomotoras diesel hasta Puerto Ordaz, hasta la planta de procesamiento de mineral de hierro (PMH) y el embarque o despacho del producto final.

### **3.4 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS**

De acuerdo con Andara (2005) el método de explotación es minería a cielo abierto invertida (*open pit*), utilizando bancos de 15 m de altura, cuya apertura se realiza generalmente en las laderas de los diferentes yacimientos, con avance hacia el centro hasta llegar a los límites de excavación. La extracción de la mena comienza en la parte superior del yacimiento y va descendiendo en forma de fosa (ver figura 3.19), hasta el límite de excavación debido a los espacios operativos para realizar las actividades de mina. La mena que no puede ser asimilada para la producción es apilada en depósitos y/o escombreras.

La construcción de rampas de producción está determinada por el tamaño del equipo, que generalmente se diseña tres veces más amplia que el ancho del equipo, para que el mismo pueda circular con un mínimo de espacio operativo. En general, el ancho de

la rampa de producción es de 30 m, lo cual incluye 3 m para la cuneta y 3 m para el muro de protección. Tiene pendiente máxima de 10%.

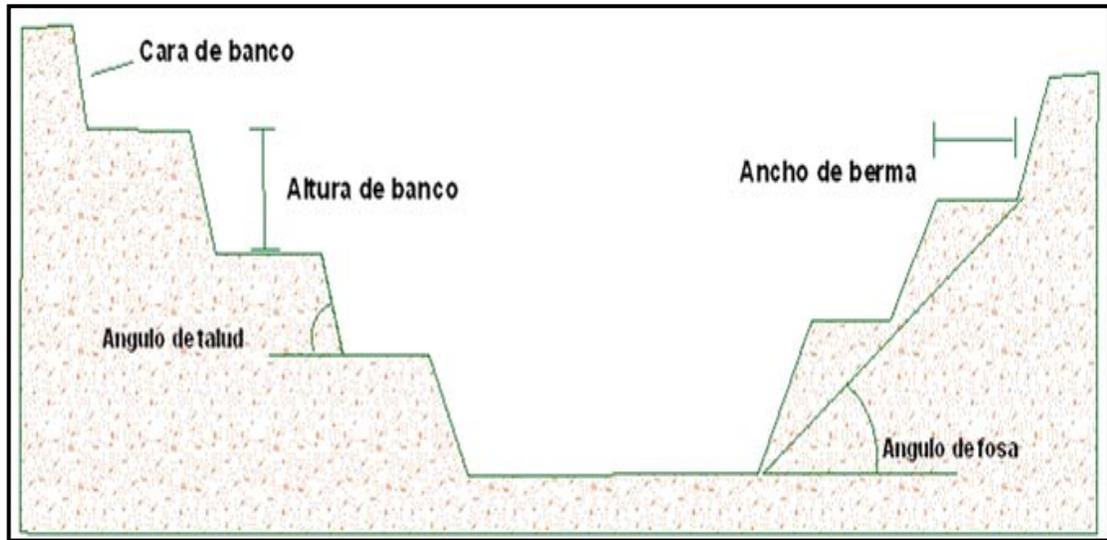


Figura 3.19 Fosa abierta, "Open Pit"  
Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4.1 Características del diseño geométrico de bancos

Las características del sistema de bancos de los yacimientos, de acuerdo con la experiencia práctica de la Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina y en concordancia con las propiedades mecánicas de la roca (ver figura 3.20), son las siguientes:

- ♣ Altura de banco: 15 m
- ♣ Ancho mínimo de las bermas: 10 m
- ♣ Ángulo de talud: 70°
- ♣ Ángulo de fosa, para distintas litologías:
  - Mena talud 1:1 ángulo 45°
  - Cuarcita talud 1:1 ángulo 45°
  - Laterita talud 1:1<sup>1/4</sup> ángulo 38°
- ♣ Pendiente máxima de las rampas: 10%
- ♣ Pendiente de los pisos de trabajo: 2 %

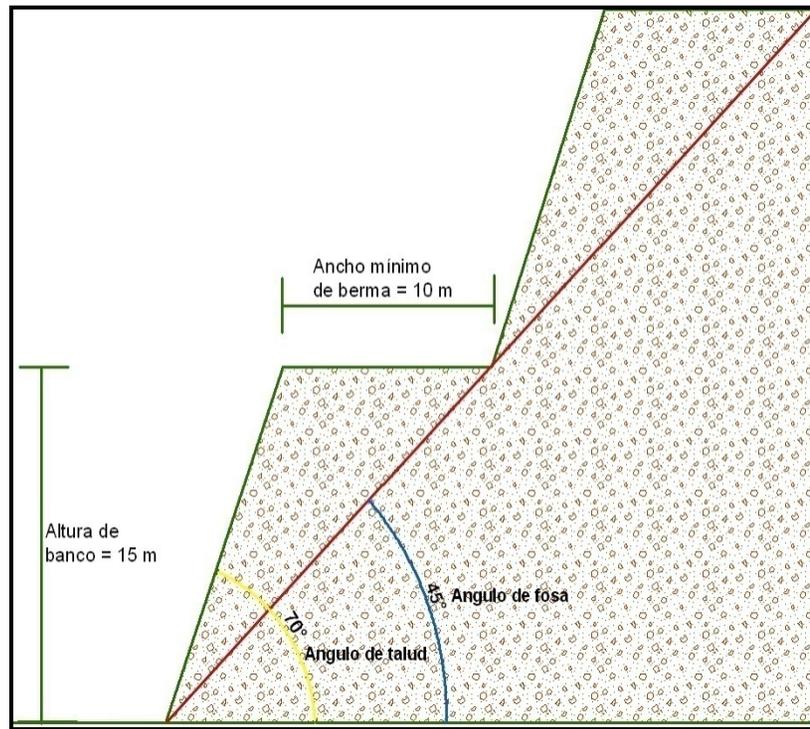


Figura 3.20 Diseño geométrico del sistema de bancos en CVG-FMO.  
Fuente: Elaboración Propia.

### 3.5 DEPÓSITOS Y ESCOMBRERAS

A los materiales no económicos, en CVG-FMO, se les llama Materia Prima no Conforme (MPNC), están siendo colocados en depósitos o escombreras de acuerdo a los siguientes criterios:

- ♣ Material con alúmina mayor o igual a 4% ( $Al_2O_3 \geq 4\%$ ) y/o fósforo en proporción mayor o igual a 0,25% ( $P \geq 0,25\%$ ), se envía a escombreras.
- ♣ Material con sílice mayor o igual a 21% ( $SiO_2 \geq 21\%$ ) es enviado a depósitos.

De acuerdo con las especificaciones anteriores y con las propiedades de los materiales, se almacenan como sigue:

- ♣ En depósitos:
  - cuarcitas duras y friables
  - minerales de alto tenor con alta sílice

- ♣ En escombreras:
  - materiales con alto fósforo
  - materiales con alta alúmina

Los depósitos y escombreras en el CFSI se clasifican según su configuración topográfica como depósitos externos de tipo valle. De acuerdo a la secuencia constructiva son depósitos con vertido libre. Éstos pueden ser construidos en valles en forma de terrazas ascendentes, es decir, de abajo hacia arriba. Los materiales son colocados en los valles y se conforman mediante empuje directo del material hasta el fondo, por sucesivas capas, conformándolas desde la hondonada hasta la altura necesaria, o por niveles desde arriba (ver figura 3.21)

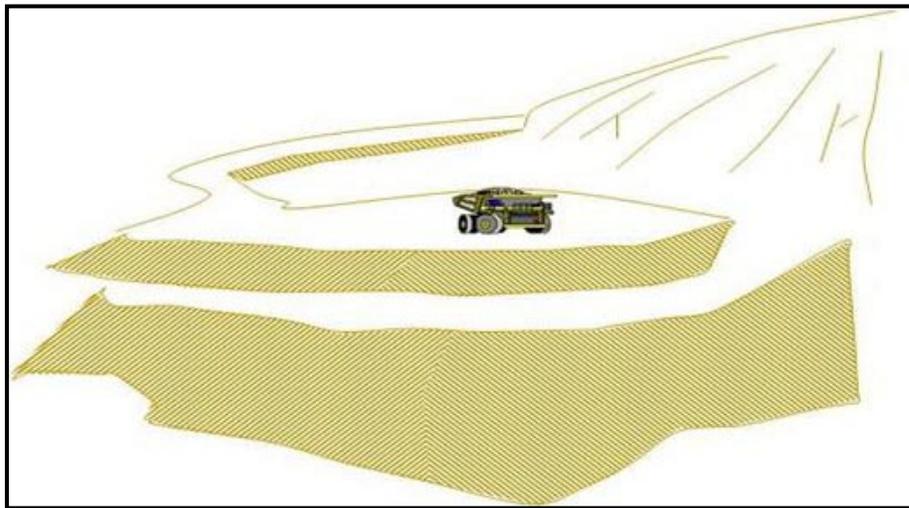


Figura 3.21 Depósitos y/o escombreras tipo valle.  
Fuente: Urbina (2000).

### 3.5.1 Características del diseño geométrico de los depósitos y/o escombreras.

De acuerdo con los cálculos y los parámetros manejados en las diferentes minas por CVG-FMO, los depósitos tienen las siguientes características de diseño:

- ♣ Altura de terraza: 10 m para la primera terraza y 5 m para las restantes

- ♣ Inclutación del talud: 33°
- ♣ Inclutación general del talud: 20°
- ♣ Ancho de berma: 10 m
- ♣ Ancho de terraza: 15 m
- ♣ Pendiente de piso: 1%
- ♣ Máxima pendiente de vías: 10%
- ♣ Ancho de rampas de acceso: 30 m
- ♣ Ancho mínimo de vías: 10 m

En la figura 3.22 se muestra el diseño geométrico.

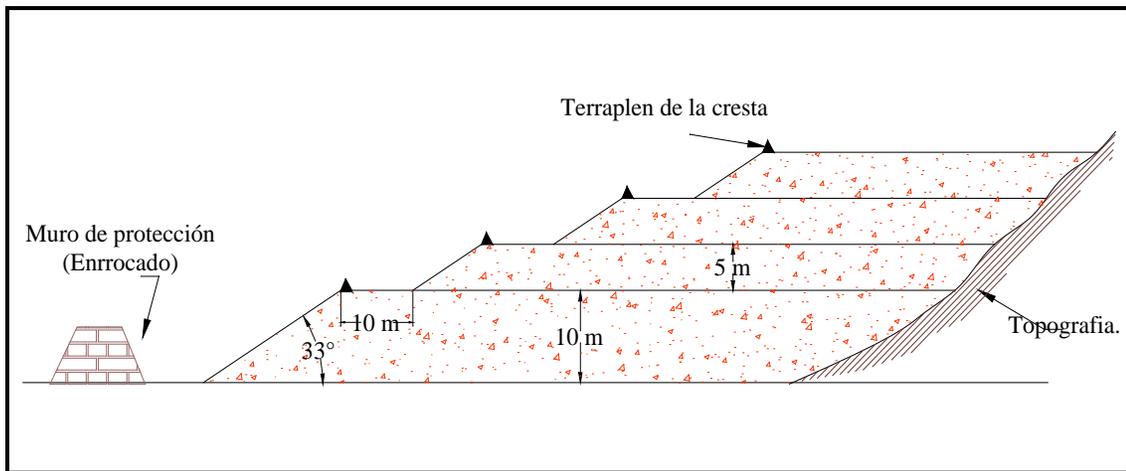


Figura 3.22 Diseño geométrico de depósitos y/o escombreras en CVG-FMO.  
Fuente: Urbina (2000)

### 3.6 RESERVAS RECUPERABLES

De acuerdo con CVG-FMO, en su informe del año 2005, las reservas recuperables son aquellas porciones de recursos minerales económicamente minables basados en una técnica de optimización de fosa (método de Cono Flotante o Lersh-Grossman) que resultan en un tonelaje y grado que pueden ser base para un proyecto viable. Las reservas recuperables se basan en el cálculo de la fosa final de excavación (*Pit Limit*) siguiendo un criterio económico. La forma de calcular dichas reservas toma en cuenta los siguientes parámetros:

### 3.6.1 Modelo tridimensional del depósito

El modelo para yacimientos metálicos se representa a través de un sistema tridimensional de bloques (ver figura 3.23). Con este modelo se discretiza el depósito en unidades de explotación, donde cada uno de ellos contiene información de la calidad del yacimiento:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , P, Mn, pérdida por calcinación (PPC), grupo litológico predominante, densidad y cota topográfica; cada bloque tiene su ubicación espacial (IX, IY, IZ) y dimensiones fijas; para el caso de los modelos en uso, la dimensión de cada bloque es 10x10x15 (DX DY DZ).

Cada bloque tiene un grado químico y propiedades físicas asociadas; en función del punto de corte (*cut-off*) que se aplica (corte en sílice y fósforo), un bloque puede ser clasificado como: alto tenor conforme (HGO1), alto tenor no conforme alto en sílice (HGO2), alto tenor no conforme alto en fósforo (HGO3), no conforme (NCO), cuarcita friable y finos muy silíceos (FPC), cuarcita dura (DPC) y laterita (LAT).

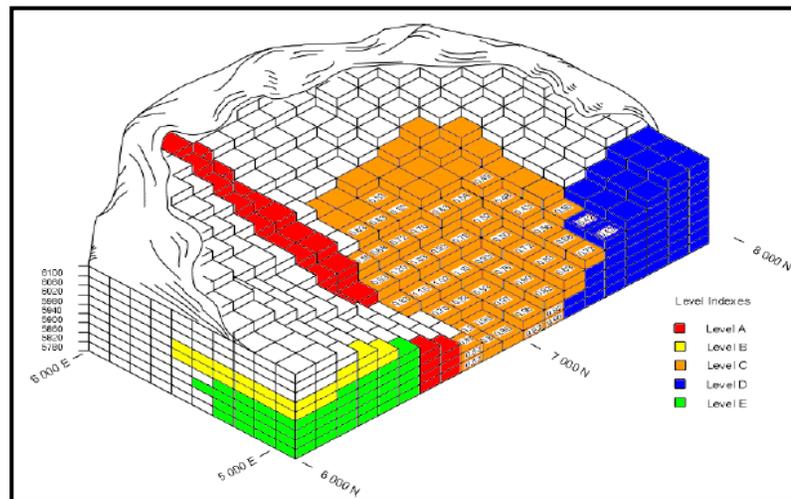


Figura 3.23 Modelo tridimensional de los depósitos.  
Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.

### 3.6.2 Optimización de la fosa final basada en “Cono Flotante”

El método del Cono Flotante (*The Floating Cone Method*) fue desarrollado por la Kennecott Copper Corporation a principios de los años 60. La técnica requiere un modelo de bloques tridimensional al cual se le aplica un cono virtual móvil (ver

figuras 3.24 y 3.25); este algoritmo genera una serie de conos incrementales a través de pases múltiples y marca aquellos bloques como minables cuando el valor neto económico de todos los bloques dentro del cono incremental da un valor neto positivo.

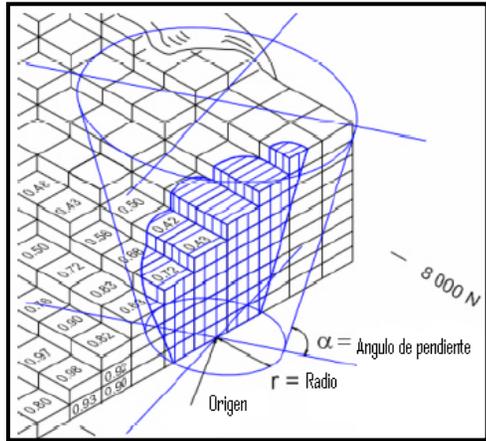


Figura 3.24 Diagrama del cono flotante.

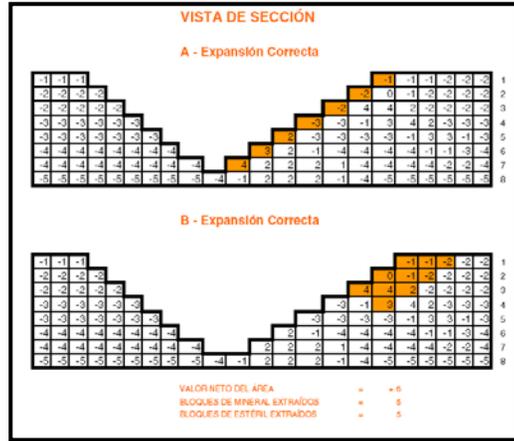


Figura 3.25 Vista de las secciones.

Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina.

El método del Cono Flotante da como resultado una superficie que garantiza un valor neto positivo, dicha superficie corresponde a la fosa final de excavación o “pit limit”.

Dicha superficie necesita ser suavizada para generar contornos alisados sobre los cuales se realizan los cálculos de las reservas recuperables.

Con base en esta metodología, aplicada por CVG-FMO, las reservas recuperables del CSFI son las siguientes:

**Tabla 3.1 Reservas recuperables de alto tenor**

MINA	Mt	% Fe seco	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% PPC	% P
SI	95.932	67,02	1,32	0,64	2,25	0,05
LB	316.075	65,62	1,3	0,69	4,19	0,079
LP	14.795	65,12	1,42	0,94	4,54	0,074
SJ	70.041	65,61	1,67	0,90	3,64	0,065

Mt = millones de toneladas

Cifras actualizadas al 01/01/07, Fe seco mayor 55% SÍLICE <2 %, FOSFORO <0.120 %.

Fuente: CVG-FMO Jefatura del área de Planificación y Desarrollo de Mina

**Tabla 3.2 Reservas recuperables de alto tenor, más cuarcita friable y finos muy síliceos (FPC)**

<b>TIPO DE MENA (Mt)</b>	<b>SI</b>	<b>LB</b>	<b>LP</b>	<b>SJ</b>
<b>Alto tenor</b>	105.616	333.767	18.590	73.559
<b>FPC</b>	66.731	134.931	26.376	43.578
<b>TOTAL</b>	<b>172.347</b>	<b>468.698</b>	<b>44.966</b>	<b>117.137</b>

Mt = millones de toneladas

Cifras actualizadas al 01/01/07, Fe seco mayor 55% Sílice <6%, Fosforo < 0,11 %

Fuente: CVG-FMO Jefatura del Área de Planificación y Desarrollo de Mina

### **3.7 SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL**

El inicio del sistema de gestión ambiental en CVG-FMO ocurrió en enero de 1993, fecha cuando la operadora se inscribió en el registro de actividades susceptibles de degradar el ambiente (RASDA), con el objetivo de apegarse a la legislación ambiental vigente. En noviembre de 1998 se establece un compromiso entre CVG-FMO y el MARN, mediante la aprobación de una serie de cronogramas de adecuación ambiental, orientados a prevenir, controlar, minimizar los aspectos e impactos determinados y así cumplir con la legislación ambiental.

#### **3.7.1 Programa de adecuación ambiental**

El programa de adecuación ambiental contempla los siguientes sistemas y sus objetivos:

- ♣ Control de polvo: incluye actividades de riego de vías, usando camiones cisterna.
- ♣ Control de erosión y arrastre de sedimentos: prevenir y disminuir la erosión y el arrastre de sólidos hacia los cuerpos de agua.
- ♣ Control de efluentes industriales y de aguas servidas en el área de talleres: manejar los efluentes industriales y aguas residuales.
- ♣ Programa de manejo de materiales excedentes industriales peligrosos, reutilizables y comercializables: disminuir y controlar el manejo de estos tipos de materiales.

- ♣ Programa para el manejo adecuado de los aceites industriales usados.

También CVG-FMO posee un plan de desarrollo sustentable para el CFSI, el cual contempla un conjunto de acciones que están enmarcadas dentro de la normativa técnica ambiental, con el objetivo de minimizar los impactos ambientales que generan sus actividades.

El programa de gestión ambiental contempla los siguientes programas:

- ♣ Sensibilización y conciencia ambiental.
- ♣ Investigación y valoración de los recursos naturales.
- ♣ Recuperación de áreas degradadas.
- ♣ Planificación de minas, con miras a la protección ambiental.

### **3.8 PROYECTOS ESTRATÉGICOS**

Dentro de las estrategias de fortalecimiento de la operadora se encuentra un proyecto que incide directamente en esta investigación. Éste consiste en la construcción de una Planta de Concentración de Cuarzita Friable, ya que se pueden incrementar las reservas recuperables, con la consecuencia directa de alargar la vida de las minas del CFSI.

De acuerdo con el plan de minas a largo plazo (Plan de Minas 2001-2025), la situación actual de CVG-FMO revela la reducción drástica de las reservas de alto tenor ( $\text{Fe} > 55 \%$ , contenido de fósforo,  $\text{P} < 0,090 \%$  y sílice,  $\text{SiO}_2 < 4 \%$ ), acordes con las exigencias del mercado, colocando la vida operativa de las minas en tan sólo 14 años, al considerar las proyecciones de ventas.

Sin embargo en el CFSI existen grandes cantidades de minerales de bajo tenor con bajo contenido de fósforo. Estos pueden ser transformados en minerales de alto tenor mediante procesos de concentración, aumentando las reservas recuperables y alargando la vida del CFSI en 40 años, aproximadamente.

La planta de concentración de cuarcita friable ha sido planificada para comenzar a partir del año 2008, con el fin de producir anualmente 8 millones (Mt/año) de productos concentrados, a partir de minerales friables de alta sílice, con el financiamiento interno de 32% y externo de 68%, para generar 150 empleos directos y 700 indirectos.

## ***CAPÍTULO IV. CIERRE DE MINA Y CRITERIOS PARA SU PLANIFICACIÓN***

### **4.1 LEGISLACIÓN AMBIENTAL VENEZOLANA VIGENTE**

Hasta ahora Venezuela no tiene una legislación específica que tenga en consideración el cierre de mina, sin embargo en la normativa ambiental vigente se encuentra una serie de leyes, reglamentos y decretos que han sido establecidos para la conservación, defensa y mejoramiento del ambiente.

En la actualidad el órgano ejecutivo encargado de legislar y normar procedimientos en materia de conservación, defensa y mejoramiento del ambiente es el Ministerio del Ambiente (MINAMB). Y en materia de regulación de la explotación de recursos minerales, existentes en el territorio nacional, el órgano ejecutivo encargado es el Ministerio de Industrias Básicas y Minería (MIBAM).

#### **4.1.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela.**

El documento de mayor rango en la escala legal es la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (1999), aprobada en consulta pública y publicada en Gaceta Oficial del jueves 30 de diciembre de 1999, N° 36.860. Ésta expone en su artículo 106 que “El Estado atenderá a la defensa y conservación de los recursos naturales de su territorio y la explotación de los mismos estará dirigida primordialmente al beneficio colectivo de los venezolanos y las venezolanas”.

De igual forma en los artículos 127, 128 y 129, sobre los derechos ambientales, se establece que es un derecho y un deber proteger y mantener el ambiente y que todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas deben ser previamente acompañados por estudios de impacto ambiental y socio cultural. En lo relativo a la protección de las aguas, en el artículo 304 se expone: «Todas las aguas son bienes de dominio público de la Nación (...)», por lo cual la ley de aguas deberá establecer

«las disposiciones necesarias a fin de garantizar su protección, aprovechamiento y recuperación, respetando las fases del ciclo hidrológico y los criterios de ordenación del territorio».

#### **4.1.2 Leyes Ambientales**

**Ley Orgánica del Ambiente:** Ésta ley, conocida como LOA, fue publicada en la Gaceta Oficial (G.O.) N° 31.004, de la República de Venezuela, de fecha 16 de junio de 1976. Recientemente, ha sido modificada y aprobada la nueva Ley Orgánica del Ambiente, publicada en G.O. N° 5.833 Extraordinario del 22 de diciembre de 2006, con lo cual queda derogada la anterior. Esta ley establece los principios rectores para la conservación, defensa y mejoramiento del ambiente en beneficio de la calidad de vida.

En su artículo 19 define las actividades susceptibles de degradar el ambiente; en el ordinal primero expresa “las que directa o indirectamente contaminen o deterioren el aire, el agua, los fondos marinos, el suelo o el subsuelo o incidan desfavorablemente sobre la fauna o flora”.

**Ley Penal del Ambiente:** Ésta fue publicada en la G.O. No. 4.358, de la República de Venezuela, en fecha 03 de enero de 1992. Tiene por objetivo tipificar como delitos aquellos hechos que violen las disposiciones relativas a la conservación, defensa y mejoramiento del ambiente y establece las sanciones penales correspondientes a los ilícitos ambientales. Así mismo, determina las medidas precautelativas, de restitución y de reparación, a que hubiere lugar.

**Ley de Aguas:** Esta ley ha sido publicada muy recientemente en la G.O. N° 38.595, en fecha 02 de enero de 2007, de la República Bolivariana de Venezuela. Ésta deroga a Ley Forestal de Suelos y Aguas, publicada en la G.O. N° 1.004, en fecha 26 de enero de 1966, la cual establecía “la conservación, fomento y aprovechamiento de los recursos naturales y los productos que de ellos se derivan”. La ley de Aguas posee 8

títulos y está constituida por 129 artículos, entre los cuales destacan las consideraciones generales; la conservación y el aprovechamiento sustentable de las aguas; regiones y cuencas hidrográficas; el control y efecto negativo de las aguas sobre la población e instrumentos de gestión, sanciones administrativas, entre otros.

**Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio:**

Esta ley ha sido publicada muy recientemente en la G.O. N° 38.633, en fecha 27 de febrero de 2007, de la República Bolivariana de Venezuela. Ésta deroga a Ley Orgánica de la Ordenación del Territorio, publicada en la G.O. N° 38.633, en fecha 27 de febrero de 2007. La nueva ley tiene por objeto “establecer las disposiciones que regirán el proceso general para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio, en concordancia con las realidades ecológicas y los principios, criterios,, objetivos estratégicos del desarrollo sustentable, que incluyan la participación ciudadana y sirvan de base para la planificación del desarrollo endógeno, económico y social de la Nación.

**4.1.3 Decretos Ambientales**

**Decreto 1257. Normas para la Evaluación de Actividades Susceptibles de Degradar el Ambiente:** Éste fue publicado en la G.O. N° 35.946, de la República de Venezuela, en fecha 25 de abril de 1996. En éste se expresan e indican los procedimientos conforme a los cuales debe ser realizada la evaluación ambiental de aquellas actividades que presentan potencial de ocasionar daños y degradar los factores físicos naturales socioeconómicos, culturales y perceptuales por usos que intervienen el ambiente.

Es importante destacar que en el artículo 8°, de esta normativa, se establece “la obligatoriedad de presentar Evaluaciones Ambientales Específicas cuando se trate de la reactivación, ampliación, reconversión, cierre, clausura y desmantelamiento de las actividades señaladas en el listado contenido en el artículo 6° (...)”.

Aun cuando, el artículo 14° establece que la autorización de afectación de los recursos naturales debe indicar: “las condiciones bajo las cuales se desarrollará la afectación del ambiente durante todas las etapas del programa o proyecto (...)”. No obstante, en estas etapas no aparece indicada explícitamente la palabra “cierre”. En cambio, aparecen “implantación, operación, clausura, desmantelamiento y recuperación de las áreas degradadas”.

Y a pesar de que en el artículo 3° quedan definidos los términos: “Clausura: Cese temporal o definitivo de una instalación por orden de una autoridad”, mientras que: “Cierre: Cese temporal definitivo de una actividad o de la operación de una instalación por cualquier motivo distinto a la orden de una autoridad”. Adicionalmente: “Desmantelamiento: Operación de desmontaje de una instalación”.

**Decreto 638:** Éste fue publicado en la G.O. N° 4.899 Extraordinario, de la República de Venezuela, del 19 de mayo de 1995. En éste se establecen las normas para el mejoramiento de la calidad del aire y la preservación y control de la contaminación atmosférica, producida por fuentes, fijas y móviles capaces de generar emisiones gaseosas y partículas atmosféricas. Se incluye un procedimiento para la adecuación de las actividades que generan emisiones a los parámetros establecidos en esta norma.

**Decreto 883:** Éste fue publicado en la G.O. N° 5.021 de la República de Venezuela, de fecha 18 de diciembre de 1995. En este decreto se establecen las normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua y de los vertidos líquidos. Tiene como propósito garantizar la protección de las cuencas hidrográficas y el control de los vertidos o efluentes líquidos susceptibles de degradar el medio acuático y alterar los niveles de calidad exigibles para conservar la calidad positiva del ambiente.

**Decreto 2.216:** Éste fue publicado en G.O. N° 4.418, en fecha 23 de abril de 1992, de la República de Venezuela. Consiste en las normas para el manejo de los desechos sólidos de origen doméstico, comercial e industrial o de cualquier otra naturaleza que

no sean peligrosos. Se regulan las operaciones de manejo de los desechos sólidos, con el fin de evitar riesgos a la salud y al ambiente.

**Decreto 2.220:** Éste fue publicado en G.O. N° 4.418, en fecha 27 de abril de 1992, de la República de Venezuela. Consiste en las normas para regular las actividades capaces de provocar cambios de flujo, distribución de cauces y problemas de sedimentación. Tiene por objeto controlar el desarrollo de actividades que por generar, cambios en los sistemas de control de obras hidráulicas, obstrucción de cauces y escorrentía y producción artificial de sedimentos, son susceptibles de ocasionar daños tales como: inundaciones, déficit en la distribución de aguas, inestabilidad de cauces y alteración de la calidad de las aguas.

**Decreto 2.226:** Éste fue publicado en G.O. N° 4.418, en fecha 27 de abril de 1992, de la República de Venezuela. Consiste en las normas ambientales para la construcción de picas y construcción de vías de acceso para proyectos socioeconómicos.

**Decreto 2.212:** Éste fue publicado en G.O. N° 35.206, en fecha 07 de mayo de 1996, de la República de Venezuela. Se refiere a las normas para las actividades de deforestación, movimiento de tierra y estabilización de taludes.

#### **4.1.4 Otras Leyes, Reglamentos y Acuerdos**

**Ley de Minas:** Corresponde al Decreto N° 295, con Rango y Fuerza de Ley de Minas, publicado en la G.O. N° 5.382, en fecha 28 de septiembre de 1999. Esta ley tiene por objeto regular todo lo referente a las minas y a los minerales existentes en el territorio nacional, incluido su exploración y explotación, así como el beneficio, almacenamiento, tenencia, circulación, transporte y comercialización, externa o interna, de las sustancias extraídas, salvo lo dispuesto en otras leyes. En el artículo 5 establece que: “ Las actividades mineras reguladas por esta Ley, se llevaran a cabo científica y racionalmente, procurando siempre la óptima recuperación o extracción

del recurso minero, con arreglo al principio del desarrollo sostenible, la conservación del ambiente y la ordenación del territorio”.

**Reglamento General de la Ley de Minas:** Éste fue publicado en G.O. N° 37.155, en fecha 09 de marzo de 2001. En el Título I, de las Disposiciones Fundamentales, el artículo 1° establece el objeto desarrollar la actividad minera sujeta a las disposiciones contenidas en la Ley de Minas, en las normas que dicte el Ejecutivo Nacional, a las demás disposiciones legales que le sean aplicables y a los principios científicos y técnicos referentes a la minería.

**Declaración de Caracas:** Se lleva a cado el 25 de octubre de 1999, en el marco de la Cuarta Conferencia Anual de Ministros de Minería de las Américas (CAMMA, 1999). En su parte considerativa expresa: “Que las condiciones de la fase de cierre de los proyectos mineros deben ser consideradas desde la etapa del diseño del proyecto minero y que el cierre planificado constituye un elemento necesario para que la minería contribuya al desarrollo sostenible de nuestros países, permitiendo establecer condiciones más claras y estables para la inversión”.

**Acuerdo de Entendimiento de Ministros de Minería de las Américas:** Como consecuencia de la Declaración de Caracas (1999), el Ministerio de Energía y Minas (actual MIBAM) firmó el memorándum de entendimiento para desarrollar los principios generales y no vinculantes sobre cierre de faenas mineras en la región latinoamericana. Este acuerdo consiste en una actividad preliminar que resulta en una propuesta presentada por Chile (2000) a la Iniciativa de Investigación sobre Políticas Mineras, IIPM (*Mining Policy Research Initiative* (MPRI, Canadá), denominada “propuesta de Coordinación de Proyectos Regionales de Legislación, Institucionalidad y Opciones Técnicas sobre Abandono de Faenas y Cierre de Minas”.

Los países seleccionados para la firma del Memorándum de Entendimiento fueron: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Perú, Canadá, México, Estados Unidos, Venezuela

y cualquier otro país miembro de Ministerios de Minería de las Américas (CAMMA) que manifieste la voluntad de comprometer su participación activa en el grupo de coordinación.

#### **4.2 EXPERIENCIA LATINOAMERICANA SOBRE CIERRE DE MINAS**

La experiencia venezolana en cierre de minas es limitada, aunque en los últimos años se ha puesto de manifiesto el interés por el tema de recuperación ambiental por parte de algunas operadoras mineras. Por esta razón, en esta investigación se consultan otros sistemas legales americanos más desarrollados en el tema, como referencia.

El sistema boliviano vigente es el más avanzado en cuanto a exigir una planificación de cierre de mina. Éste especifica los objetivos y contenidos de los planes, así como períodos de prescripción, sin embargo, no contempla una garantía financiera de cumplimiento, que es un elemento esencial para asegurar la efectividad de estos sistemas.

En la República de Bolivia, de acuerdo con el reglamento ambiental para actividades mineras, el concesionario u operador minero debe: 1) cerrar y rehabilitar las áreas con actividades mineras, dentro y fuera del perímetro de su concesión, cuando concluye parcial o totalmente sus operaciones mineras, en conformidad con lo establecido en su respectiva licencia ambiental, o cuando abandona, por más de tres años, sus operaciones o actividades mineras; 2) llevar a cabo el cierre de acuerdo con un plan de cierre y rehabilitación del área, aprobado en la licencia ambiental; y 3) implementar medidas de cierre y rehabilitación durante la operación minera, cuando fuera posible realizar un seguimiento post-cierre por un período de tres años.

En la República Federativa de Brasil, todos los proyectos mineros deben presentar un plan de recuperación de áreas degradadas, que debe ser aprobado por la autoridad

ambiental competente durante el proceso de autorización ambiental. La recuperación debe tener por objetivo el retorno del sitio degradado a una forma de uso del suelo, persiguiendo la obtención de la estabilidad del medio ambiente.

En la República de Chile, la normativa sobre Estudios de Impacto Ambiental (EIA) se aplica a una generalidad de proyectos, incluyendo los de desarrollo minero, y establece que la planificación del cierre debe incluirse en el EIA del proyecto respectivo, al menos, en términos generales. Esta normativa se aplicó a la mayor parte de los proyectos mineros que se iniciaron en los años 90. En 2001, el Gobierno resolvió fortalecer los cuerpos normativos existentes en la actualidad, no obstante existe un proyecto de Ley sobre Cierre de Faenas Mineras, cuyos aspectos más significativos son:

- 1) distingue entre abandono y cierre: abandono es el incumplimiento de los deberes y obligaciones impuestos por la ley; cierre, en cambio, implica la aplicación de medidas de acuerdo con un plan autorizado;
  - 2) el principal instrumento de este sistema es el plan de cierre, que ha de cubrir desde el primer día de ejecución de la faena hasta su cierre total;
  - 3) el sistema incluye una garantía financiera de cumplimiento del plan de cierre, con el objeto de asegurar, en todo momento, la disponibilidad de fondos para cubrir, en forma exclusiva, costos de las actividades contempladas en los planes de cierre de faenas e instalaciones mineras; y
  - 4) una vez que son total y oportunamente implementadas las medidas comprometidas en el plan de cierre aprobado por la autoridad, se contempla el otorgamiento de certificados de cumplimiento con el plan de cierre, como incentivo.
- Este sistema ha sido diseñado para ser aplicable a todas las faenas mineras, no obstante contempla algunos instrumentos diferenciados para la pequeña minería.

En la República de Ecuador, el reglamento ambiental para actividades mineras obliga a realizar operaciones de desmantelamiento y reacondicionamiento de las áreas, de acuerdo con el EIA que se presenta antes del inicio de actividades. Es responsabilidad

del titular de los derechos mineros, remediar los daños que se produzcan al ambiente, antes y con posterioridad al cierre de operaciones mineras; así como rehabilitar y compensar los daños y alteraciones al ambiente, cuyo origen directo sean las actividades mineras concluidas.

En la República de Perú, de acuerdo con el reglamento para la protección ambiental en la actividad minero metalúrgica, el titular de la actividad minera debe presentar un plan de cierre que incluya las medidas a adoptar para evitar efectos adversos al medio ambiente por los residuos sólidos, líquidos o gaseosos que puedan existir o puedan aflorar en el corto, mediano o largo plazo, tanto respecto del cierre temporal como definitivo de labores.

El documento con la Guía Ambiental para el Cierre y Abandono de Minas del Ministerio de Energía y Minas, de Perú, contiene los lineamientos para el diseño de las actividades de cierre, reconociendo que tales actividades son específicas para cada yacimiento. Existe también un proyecto de Ley de Plan de Cierre de Operaciones para la Actividad Minera, en discusión, que: 1) regula el cierre definitivo teniendo en vista el objetivo de revalorizar el área utilizada o perturbada; 2) contempla el otorgamiento de certificados de cumplimiento con el Plan de Cierre a modo de incentivo; y 3) incorpora un sistema de garantía de cumplimiento.

### **4.3 CIERRE DE MINA**

La introducción de nuevas actividades económicas en un área geográfica, como la minería, ocasiona inevitablemente cambios considerables tanto en el territorio, como al conjunto de ciudadanos relacionados en ella. Y, mientras la vida de la mina tiende a ser relativamente corta (por ejemplo, operando durante 10 a 50 años), los cambios en el ambiente y en la sociedad, producidos por las minas, probablemente persistirán por un tiempo muy largo.

La naturaleza de los cambios varía dramáticamente; éstos pueden ser positivos o negativos, pueden durar por décadas o milenios, pueden ser localizados o afectar áreas distantes. Por otro lado, los cambios potenciales en un sitio determinado dependen de las condiciones ambientales y socio-económicas originales. Los impactos de la minería pueden ser minimizados o mantenidos de forma tal que el legado total neto de la actividad sea positivo. Esta es precisamente la esencia del cierre de mina.

La literatura técnica reporta algunas definiciones de cierre de mina, por ejemplo: El Ministerio de Energía y Minas del Perú (2002) MEM - PERÚ expresa que: “El cierre de minas puede definirse como el conjunto de actividades a ser implementadas a lo largo del ciclo de vida de la mina a fin de cumplir con los criterios ambientales específicos y alcanzar los objetivos sociales deseados después de la etapa de minado. El cierre de minas es un proceso progresivo que empieza en la primera etapa del proyecto con el diseño conceptual y termina sólo cuando se han alcanzado de manera permanente los objetivos específicos de cierre”.

El cierre de mina incluye todas las tecnologías que se requieren para alcanzar la seguridad física y la protección ambiental a largo plazo en los alrededores de la instalación minera.

Una definición más sencilla la aporta el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN, 2003): “Es la etapa que sigue después que termina una operación minera”. Se puede definir entonces en el sentido más estricto que, el cierre de mina es un proceso que busca rehabilitar las áreas utilizadas por la minería una vez concluidas las operaciones, para que el terreno y las comunidades tengan condiciones similares o mejores a las que existían antes del desarrollo de la actividad minera.

Un cierre se realiza, entre otras causas, por el agotamiento del yacimiento, por una baja en la ley del mineral o precio de los minerales, por condiciones climáticas



ocurrencia del daño y la remediación. Los otros objetivos de cierre son verdaderamente directos y frecuentemente son específicos para el sitio (MEM – PERÚ, 2002).

De acuerdo con González (1999), en la mayoría de los sistemas desarrollados en cierre de mina se identifican como comunes los objetivos relativos a la estabilidad física y química del terreno y las estructuras, también la salud y seguridad pública, y la recuperación del terreno para un uso posterior.

A su vez MEM – PERÚ (2002) expresa que: “Los objetivos del cierre son la protección de la salud humana y el medio ambiente mediante el mantenimiento de la estabilidad física y química; un uso beneficioso de la tierra, una vez que concluyan las operaciones mineras (por ejemplo: hábitat para la fauna silvestre, campos de pastoreo, recreación, o futura exploración y explotación minera)”.

“La estabilidad física implica la estabilidad de taludes, con lo que se protege de movimientos de masa tanto a las áreas locales como aquéllas ubicadas aguas abajo. Sin embargo también se refiere a la estabilidad contra la erosión eólica y del agua, y por lo tanto, el transporte desde la instalación, de polvo o sedimentos que pudieran tener un impacto dañino sobre la salud humana y el medio ambiente”.

“La estabilidad química se refiere a la contención de sustancias químicas contaminantes y a evitar que las mismas sean introducidas al medio ambiente; ésta puede establecerse mediante el control de la fuente emisora, el control de migración, o el tratamiento”.

En el proyecto de reforma del sector de recursos mineros del Perú (PERCAN, 2005), se indica que los objetivos para el cierre de mina son los siguientes:

- ♣ Promover el cierre ordenado en lugar del abandono de los sitios mineros

- ♣ Promover el planeamiento proactivo (enfoque del “Diseño para el Cierre”)
- ♣ Promover el cierre progresivo durante las operaciones
- ♣ Garantizar la seguridad pública en el largo plazo
- ♣ Dejar el sitio en condiciones ambientalmente benignas
- ♣ Retornar las tierras mineras a un uso productivo
- ♣ Mejorar la percepción pública sobre la minería

#### 4.3.2 Escenarios del cierre de mina

**Cierre de mina temporal:** implica que las actividades del proceso minero sean temporalmente suspendidas, como resultado de las circunstancias económicas u operacionales. También podría llamarse como paralización, en éste se espera que las actividades se reinicien en el corto plazo, una vez que los factores negativos se hayan eliminado.

**Cierre progresivo:** son todas aquellas actividades relacionadas con el cierre, que son implementadas de forma progresiva durante la etapa de operación del proyecto minero, estas actividades constituyen el mecanismo más importante para minimizar la cantidad de esfuerzo necesario para la implementación de medidas de cierre final y optimizar los resultados del cierre.

**Cierre final:** El cierre final comienza cuando, a consecuencia del agotamiento de los recursos minerales económicos, cesan las operaciones de minado y de procesamiento. El cierre final comprende el desarrollo de actividades tales como: diseños de ingeniería requeridos para el desmantelamiento; demoliciones; estudios *in situ* para la disposición final y/o el rescate de materiales; estabilización física, geoquímica e hidrológica; restablecimiento de la forma del terreno; revegetación; rehabilitación de hábitats acuáticos; rehabilitación de las áreas de préstamo; reconversión laboral; provisiones para brindar servicios esenciales a la comunidad; transferencia de propiedad y acceso a las tierras; etc.

### **4.3.3 Plan de cierre de mina**

De acuerdo con el Ministerio de Minas del Perú (MEM-PERÚ, 2005), el plan de cierre es un instrumento de gestión ambiental donde se establecen pautas a ser efectuadas por el titular de la actividad minera, a fin de rehabilitar las áreas utilizadas por éste. Se busca que la rehabilitación alcance características compatibles con un ambiente saludable, seguro y adecuado para el desarrollo de la vida. La rehabilitación se llevará a cabo mediante la ejecución del plan, el cual se establece de acuerdo a las características particulares de la mina. Los planes de cierre son una manera de evitar el problema de pasivos ambientales mineros, ya que impide la creación de éstos.

González (1999) define el plan de cierre de mina como: “una herramienta que permite identificar y cuantificar los impactos ambientales negativos generados en las diferentes etapas de una faena minera, así como definir medidas de acción presentes y futuras para prevenirlos, minimizarlos y/o mitigarlos y desarrollar un plan de medidas proyectadas”.

De acuerdo con la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO, 2000), el plan de cierre es: “un documento que especifica un conjunto de acciones que permiten cumplir con los objetivos de la normativa vigente sobre cierre de faenas mineras, para lo cual considera una programación global y de detalle, tendiente a lograr el cierre de las operaciones de las mismas en forma ordenada, eficiente, progresiva y oportuna, con estricto cumplimiento del marco jurídico ambiental vigente”.

En líneas generales todo plan de cierre debe considerar objetivos propios y adecuados a las características de cada actividad minera y su entorno, los que serán planteados dependiendo de los siguientes factores: características de la actividad minera, ubicación geográfica, cercanía a centros poblados y particularidades relevantes del medio ambiente.

Los objetivos específicos varían dependiendo de las características particulares de cada mina o instalación minera, características tales como: el tipo de mineral que se extrae, los métodos de procesamiento, las condiciones climáticas y geológicas, la ubicación geográfica, la cercanía a centros poblados, las características de los componentes del medio ambiente, existencia de elementos de patrimonio cultural, etc. Tales características, entre otras, son factores que determinan los posibles riesgos o efectos ambientales que se producirán en el futuro y, por lo tanto, orientan la definición de las medidas de prevención, minimización, mitigación y restauración a ser consideradas en el plan de cierre.

En este sentido, un plan de cierre de mina permite:

- ♣ Identificar y programar con anticipación las acciones y medidas que son necesarias y suficientes, para cumplir con los objetivos de cierre.
- ♣ Ejecutar las acciones y medidas de manera paulatina y ordenada, utilizando sólo los recursos disponibles y con un costo mínimo.
- ♣ Recuperar el máximo de equipos y materiales para utilizarlos en otra actividad minera.

#### **4.4 CAMBIO DE USO DEL TERRITORIO Y USOS POTENCIALES PARA LAS ÁREAS RECUPERADAS.**

La potencialidad de uso del territorio depende de las características físicas del lugar, de la demanda para la utilización específica, de su localización, e incluso de la percepción pública. La asignación del uso minero responde a diversos factores, entre los cuales la geología del depósito es la más determinante. La ejecución de los proyectos mineros representa un uso temporal de los terrenos, con períodos de ocupación del territorio y de operaciones unitarias, durante las etapas de la vida de una mina, entre 16 y 52 años, en promedio (Hartman, 2002; pp.8-9). Estos lapsos de tiempo resultan relativamente cortos, al ser comparados con los períodos previos y posteriores a la minería, en el territorio mineralizado.

En la planificación de cierre de mina se debe tener presente y claro el concepto de uso temporal del territorio y éste, es uno de los objetivos fundamentales en un plan de cierre de mina. Definir cuál uso posterior se le dará al área afectada permite identificar cuáles son las acciones que se deben realizar para lograr recuperar un espacio. Es decir, no se puede planificar un cierre de mina, mientras no se tiene claro cuál es el uso potencial para esa área recuperada, cómo se hará el cambio de uso del territorio.

El objetivo principal de la recuperación ambiental es restituir la posibilidad de que el terreno alterado por la actividad minera vuelva a ser útil en un determinado uso, que sea compatible con los usos existentes. Hartman (2002; p.9) incluye la recuperación ambiental (*reclamation*) como una etapa en la vida de la mina, la cual subdivide en: a) remoción de edificaciones e instalaciones; b) recuperación de escombreras y vertederos de residuos; y c) monitoreo de las descargas o vertidos. De allí que, la recuperación ambiental progresiva se logra con un adecuado sistema de gestión ambiental durante las operaciones mineras.

Los usos posibles de las áreas afectadas por las actividades mineras pueden dividirse en: uso agrícola o agropecuario, uso forestal, uso residencial urbano, uso urbanístico e industrial, recreativo no intensivo y educacional, recreativo intensivo y deportivo, conservación de fauna y refugio ecológico, depósito de agua y abastecimiento a poblaciones, uso piscícola, áreas para obtención de recursos hídricos, depósitos de estériles y basuras, entre otros.

#### **4.5 CRITERIOS E INDICADORES BÁSICOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE CIERRE DE MINA.**

Los criterios e indicadores para la planificación de un cierre de mina deben estar orientados a dar soluciones de mantenimiento y/o recuperación sobre los componentes del medio ambiente o la salud y seguridad de las personas que puedan tener riesgo de ser afectados negativamente.

En el caso particular de esta investigación, que se propone el cierre de mina, se han tomado en cuenta aquellos criterios que resultan más resaltantes, específicos y necesarios, para la minería a cielo abierto de hierro, descrita en los capítulos dos y tres de este trabajo. Entre ellos se encuentran: la estabilidad de taludes, el control del proceso erosión - sedimentación, la recuperación de suelos con fines de revegetación y la rehabilitación laboral de comunidades vinculadas con la minería, como los aspectos sociales a atender en un plan de cierre.

El conocimiento geocientífico, de rocas y suelos, en las áreas intervenidas con el uso minero es una necesidad primordial.

En rocas, los estudios para determinar la calidad de la roca *in situ* se basan en parámetros geingenieriles como: resistencia a la compresión, resistencia al corte, comportamiento resistente de patrones estructurales y modos de rotura (existe abundante literatura técnica minera sobre estos parámetros).

En suelos, la estimación de los parámetros geingenieriles y los modos de rotura dependen de la naturaleza friccionante y/o cohesiva de las partículas minerales, así como de la presencia de agua en la masa de suelos. En consecuencia, la clasificación de suelos es el primer requisito para abordar las soluciones geoambientales.

A diferencia de las clasificaciones usadas tradicionalmente con fines de agroecología (que se presentará en la sección de prácticas de revegetación), la geotecnia utiliza el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, propuesto por el Profesor Arthur Casagrande, en 1942. Este sólo hace referencia a las partículas de los suelos, sin tener en cuenta para nada su estructura, compacidad cementación, etc.

Los criterios necesarios para realizar la clasificación son: la curva granulométrica, con los tamices estandarizados por la *American Society of Testing Materials* (ASTM); los límites de consistencia (límites de Atterberg) y el contenido de materia orgánica.

Los suelos son clasificados en dos (2) grandes grupos (mayor detalle en anexo 2):

- ♣ Suelos de grano grueso: contienen más del 50% de las partículas que lo componen son mayores que 0,074 mm (tamiz # 200), siendo excluidas las partículas mayores de 76,2 mm (3"). Los suelos de grano grueso se clasifican principalmente tomando como base el análisis granulométrico, que puede ser en seco o en húmedo. Estos se subdividen en dos grupos: gravas y arenas.
- ♣ Suelos de grano fino: son aquellos en los cuales el 50%, o más, de las partículas que lo constituyen son menores que 0,074 mm y se clasifican por sus características de plasticidad (consistencia), con ayuda del gráfico también propuesto por Casagrande. A este grupo corresponden los limos y las arcillas.

### Clasificación granulométrica

La clasificación granulométrica consiste en separar y clasificar por tamaños las partículas que lo componen, determinando en porcentajes del peso total la cantidad de granos por tamaños que éste contiene. Dependiendo del tamaño de los granos, este análisis puede realizarse: por tamizado o por sedimentación (ver figura 4.2)

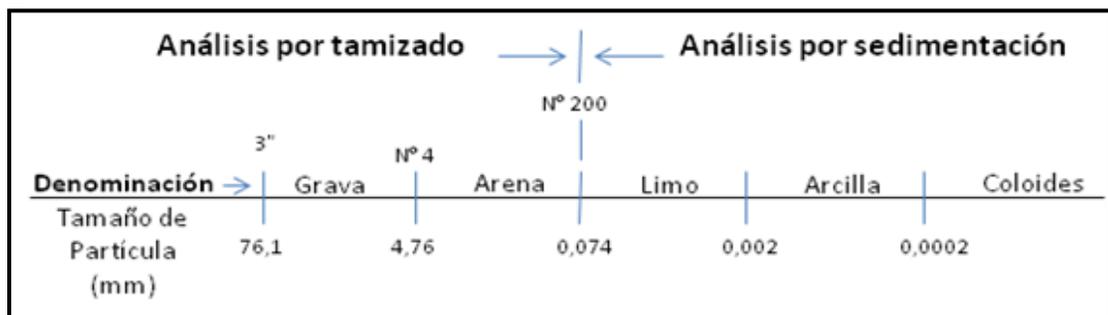


Figura 4.2 Clasificación granulométrica  
Fuente: Modificada de Ugas (1985)

- ♣ Por tamizado (Granulometría por tamizado, en seco y/o en húmedo):
  - Granulometría por tamizado, en seco: se realiza para clasificar por tamaños la fracción granular gruesa. Las partículas analizadas por este método son aquellas retenidas en el tamiz N° 10. La muestra, secada y pesada, se hace pasar por un juego de tamices, luego se pesan los retenidos en el tamiz y se calculan los acumulados, para generar la curva granulométrica.
  - Granulometría por tamizado, en húmedo (por lavado): se analiza la fracción granular fina (aquella pasante por el tamiz N°10). La muestra es secada y pesada. Luego se lava sobre el tamiz N°200. El retenido se pesa nuevamente, luego es secado y posteriormente tamizado en seco. La cantidad de material fino es determinada por diferencia entre el peso inicial y el peso del retenido de la muestra, luego de ser lavada.
  
- ♣ Por sedimentación (Hidrómetro):

Este es el más usado para hacer la determinación indirecta de los diámetros (d) y las fracciones (s) de las partículas que pasan a través de la malla N° 200. Con el hidrómetro, o densímetro de cristal, es posible conocer la variación de densidad que experimenta el medio denso. A medida que las partículas se sedimentan la densidad decrece y el densímetro se hunde cada vez más. La lectura del hidrómetro, simultáneas con las del tiempo y la temperatura, referidas al instante y peso inicial, permiten la determinación del diámetro y peso de las partículas que quedan en suspensión en un momento dado. Los resultados del hidrómetro completan la curva granulométrica para la fracción fina.

#### **4.5.1 Estabilidad de Taludes**

Uno de los criterios básicos y más importantes de la planificación del cierre de mina es la estabilidad física a mediano y largo plazo de los taludes del *pit* de mina, de los

depósitos y/o escombreras, con el objeto de proteger la seguridad de las personas con sus bienes, quienes posteriormente podrían ingresar a la mina, de instalaciones remanentes, e incluso proteger los cauces naturales de obstrucciones por movimientos de masas.

En la literatura técnica, se define como ladera al declive de una masa mineral cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural. Y define como talud (sea en corte, o en relleno) cuando el declive ha sido conformado artificialmente con un propósito específico.

El movimiento producido involuntariamente en los taludes y laderas se conoce técnicamente como deslizamiento. Éste implica el movimiento de taludes formados por diferentes materiales (roca, suelo, rellenos artificiales o combinaciones de los mismos) a través de una superficie de rotura preferencia y determinable.

El tipo de material ejerce una influencia directa en los deslizamientos, condicionando y pudiendo estimarse, de antemano, la susceptibilidad de cada material a que se desarrolle un movimiento determinado. Estos materiales se dividen en tres (3) grupos: macizos rocosos, suelos y material de relleno.

En los macizos rocosos existen series de discontinuidades naturales, antes de iniciarse el movimiento. En el caso de masas de suelos, constituidas por agregados de partículas sólidas con diferentes grados de consolidación, que pueden desarrollarse *in situ* formando una cubierta sobre los macizos rocosos, o bien haber sufrido cierto transporte.

Como material de relleno se consideran los depósitos compuestos generalmente por materiales muy heterogéneos, que han sido acumulados debido a la realización de determinadas obras o actividades.

Sobre estos grupos de materiales actúa una serie de factores cuya interacción origina que se produzca algún tipo de movimiento de masas, que será descrito más adelante.

### **Coeficiente o factor de seguridad de un talud**

El riesgo de colapso de un talud se mide en términos del llamado coeficiente o factor de seguridad (FS), que es la relación entre el conjunto de los esfuerzos resistentes o estabilizadores y los desestabilizadores que provocan la rotura del talud.

El factor de seguridad, en el caso de la minería a cielo abierto, se encuentra condicionado por las variables de la configuración geométrica de la infraestructura operativa minera, o sea, por la altura de los bancos, el ángulo de inclinación del talud general y la altura total proyectada. El FS está limitado por las propiedades geotécnicas de los materiales; entre las más importantes para su cálculo destacan: el peso específico ( $\gamma$ ), el ángulo de fricción interno ( $\theta$ ) y la cohesión (C).

El valor  $FS = 1$  señala la frontera en la cual un talud es, o deja de ser estable. La necesidad de utilizar valores de  $FS > 1$  surge como consecuencia de los siguientes factores:

- ♣ Posible existencia de características geológicas y estructurales del talud que no han sido detectadas en un estudio geotécnico.
- ♣ La heterogeneidad y anisotropía presente en el macizo.
- ♣ La determinación y variabilidad de las presiones de agua en el talud.
- ♣ Los errores derivados de las supuestas superficies de rotura utilizadas.

Según Watson (2005), “los valores que se adoptan en la práctica varían en función de las consecuencias que resultaran de su colapso y del nivel de confianza en los datos utilizados. La experiencia internacional que se obtiene teniendo en cuenta las considerables implicaciones económicas -en la selección de un coeficiente de seguridad FS próximo a 1,3- puede ser adecuado para taludes cuya estabilidad no se considere a largo plazo, como es el caso de los taludes de los frentes de trabajo que en

ocasiones se trabajan con  $FS = 1$ . Por el contrario si las condiciones son críticas, o se está ante los contornos finales,  $FS$  puede tomar valores entre 1,5 y 1,6; aunque dependiendo del tipo de roca, de sus propiedades geológicas y del grado de alteración con el tiempo, se deberán tomar medidas adicionales aún con un factor de seguridad elevado”.

### **Tipos de fallas en taludes**

En lo referente a los tipos de rotura, éstas se identifican de acuerdo con la geometría de las mismas y pueden ser: planar, en cuña, circular, o por volcamiento. Estas superficies son descritas en el anexo 3 y para mayor detalle se sugiere consultar en la abundante bibliografía geotécnica.

### **Factores que producen los deslizamientos**

Según Castillejo (1993) la variedad de tipos de deslizamientos refleja la diversidad de factores los cuales son responsables de su origen. Estos factores son caracterizados brevemente a continuación:

#### 1) Cambio del gradiente del talud

Esto puede ser debido a la interferencia natural o artificial, es decir, el socavamiento del pie del talud por la erosión o una excavación. Excepcionalmente, el cambio de gradiente del talud puede ser producido por procesos tectónicos, por subsidencia o empuje. El incremento en el gradiente del talud puede provocar un cambio de esfuerzos en la masa rocosa; el equilibrio es entonces perturbado por el incremento de esfuerzo al corte.

#### 2) Exceso de carga (rellenos, escombreras, etc.)

La sobrecarga puede producir un incremento de esfuerzo al corte y en la presión de poros, lo cual redundará en producir una disminución de la resistencia.

#### 3) Choques y vibraciones

Los terremotos, voladuras a gran escala y vibraciones de máquinas producen oscilaciones, de diferentes frecuencias, en la roca y un cambio temporal del esfuerzo puede perturbar el estado de equilibrio del talud. En arenas sueltas, los choques pueden causar una perturbación intergranular y consecuentemente, una disminución de la cohesión y ángulo de fricción. En arenas finas saturadas y arcillas sensitivas, los choques pueden resultar en un deslizamiento o rotación de los granos favoreciendo la licuefacción del suelo.

#### 4) Cambios en el contenido de agua

a) Efecto de la precipitación: el agua de lluvia penetra por los planos de discontinuidad, produciendo presión hidrostática, el incremento en la presión de poros en los suelos, induce un cambio en la consistencia, la cual causará una disminución de la cohesión y ángulo de fricción. Los deslizamientos recurrentes generalmente ocurren en los años de lluvia no usuales.

b) Algunos autores quienes han medido el potencial eléctrico entre dos estratos en contacto, en el cual el plano de deslizamiento se ha formado, explican que el incremento del contenido de agua inducen movimientos en el talud debido a un proceso de electro - osmosis.

c) En periodos de sequía, el suelo se seca, como resultado de esto se producen grietas, la cohesión del suelo es disminuida y el agua puede penetrar por ellas a la roca.

d) Cambios abruptos del nivel de agua (es decir, en represas) pueden inducir un deslizamiento de los granos, especialmente de los finos. Un violento incremento de la presión de poros puede provocar la licuefacción del suelo.

#### 5) Efectos del agua subterránea

a) El flujo de agua subterránea ejerce presión sobre las partículas del suelo, la cual deteriora la estabilidad del talud.

b) El agua subterránea puede lavar los cementos solubles, dejando espacios intergranulares vacíos; consecuentemente la cohesión disminuye y el coeficiente de fricción interna disminuye.

c) El movimiento del agua subterránea arrastra la arena fina y las partículas de limo del talud, formándose cavidades subterráneas y disminuyendo la estabilidad del talud.

d) El confinamiento de agua subterránea actúa entre los estratos como fuerza de empuje.

6) Meteorización de la roca.

La meteorización mecánica y química gradualmente perturba la cohesión de la roca. Estos son algunos indicadores, que en algunos deslizamientos, producen cambios químicos (hidratación, intercambio de iones en arcillas) inducidos por la percolación del agua; siendo otro factor de deterioro de la estabilidad.

7) Cambios en la vegetación que recubre el talud.

Las raíces de los árboles mantienen la estabilidad de los taludes por efecto mecánico y contribuyen a secar los taludes por la absorción de parte del agua subterránea.

### **Métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud**

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de taludes se muestran en la figura 4.3; se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos de equilibrio límite y métodos de cálculo en deformaciones.

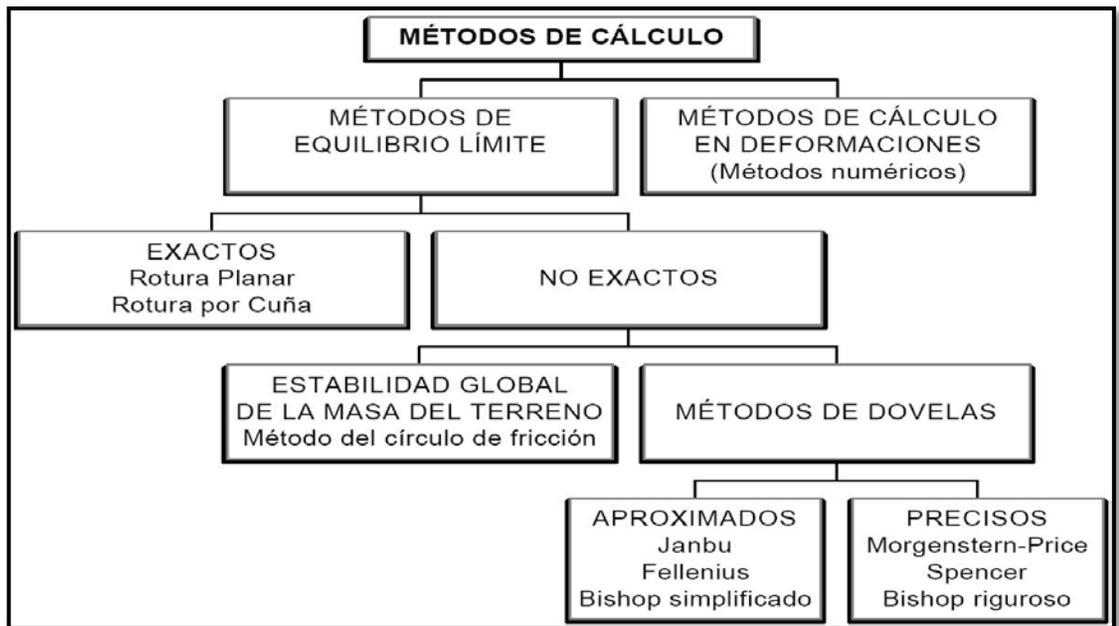


Figura 4.3 Métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud.  
Fuente: Elaboración Propia

Los métodos de equilibrio límite, los cuales se basan exclusivamente en las leyes de la estática, sirven para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Supone que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Los métodos de cálculo en deformaciones consideran las deformaciones del terreno, además de las leyes de la estática. Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse aplicando el método de los elementos finitos u otros métodos numéricos.

La estabilidad de taludes también puede analizarse mediante la utilización de ábacos. Aunque los ábacos suponen taludes simples y condiciones uniformes del suelo, se pueden utilizar para obtener respuestas aproximadas para problemas más complejos si los taludes irregulares se modelan con taludes más simples y se utilizan valores promedio de peso unitario, cohesión y ángulo de fricción.

## **Sistemas de estabilización de taludes**

De acuerdo con Suárez (1998) se pueden clasificar en cinco (5) categorías principales:

**1. Conformación del talud o ladera:** sistemas que tienden a lograr un equilibrio de masas, reduciendo las fuerzas que producen el movimiento.

- Remoción de materiales de la cabeza (corona) del talud.
- Abatimiento de la pendiente.
- Terraceo de la superficie.

**2. Recubrimiento de la superficie:** métodos que tratan de impedir la infiltración o la ocurrencia de fenómenos superficiales de erosión, o refuerzan el suelo más subsuperficial.

- Recubrimiento de la superficie del talud.
- Cobertura vegetal con árboles, arbustos y pastos.

**3. Control de agua superficial y subterránea:** sistemas tendientes a controlar el agua y sus efectos, disminuyendo fuerzas que producen movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes.

- Canales superficiales para control de escorrentía.

**4. Estructuras de contención:** métodos en los cuales se van a colocar fuerzas externas al movimiento, aumentando las fuerzas resistentes, sin disminuir las actuantes.

- Relleno o berma de roca o suelo en la base del deslizamiento.
- Muros de contención convencionales de tierra armada.
- Pilotes, anclajes, pernos o pantallas ancladas.

**5. Mejoramiento del suelo:** métodos que aumentan la resistencia del suelo. Incluyen procesos físicos y químicos que aumentan la cohesión y/o la fricción de la mezcla suelo-producto estabilizante o del suelo modificado.

1. Inyecciones o uso de químicos.

#### **4.5.2 Control del proceso erosión-sedimentación**

El control del proceso de erosión-sedimentación también constituye uno de los criterios básicos y relevantes para planificar un cierre de mina, debido a que todas las áreas de mina a cielo abierto, a corto, mediano y largo plazo, están expuestas al proceso de erosión del terreno y posterior sedimentación. Es importante conocer los procesos que hacen vulnerables y susceptibles de pérdida de los suelos, a los fines de planificar las estrategias de conservación.

##### **El proceso erosión-sedimentación**

Según Suárez (2001) el proceso de erosión es el resultado de la acción de las fuerzas de fricción de gases o fluidos en movimiento. Para un cierre de mina, la erosión es el desgaste de la superficie terrestre por acción de agentes externos como el viento y el agua. Se conocen varios tipos de erosión: por acción del viento y por acción del agua.

La erosión por acción del viento, también llamada erosión eólica, está asociada con el movimiento de partículas muy finas como consecuencia de corrientes de aire, que pueden ser: de carácter natural y otras ocasionadas por el paso de maquinaria pesada o por otras acciones que disgregan los materiales hasta convertirlos en finos y luego éstos se mueven y quedan en el ambiente. Suárez (2001) también expresa que el movimiento del viento ejerce fuerzas de fricción y levantamiento sobre las partículas del suelo, desprendiéndolas, transportándolas y depositándolas.

La erosión ocurre en suelos desprovistos de vegetación y que son expuestos a altas velocidades del viento, las partículas de menor tamaño (0,1 a 0,5 mm) son movidas en una forma de saltos o brincos, mientras que las partículas gruesas se mueven rodando y las

finas son transportadas en suspensión. En la figura 4.4 se observa el mecanismo de erosión por el viento.

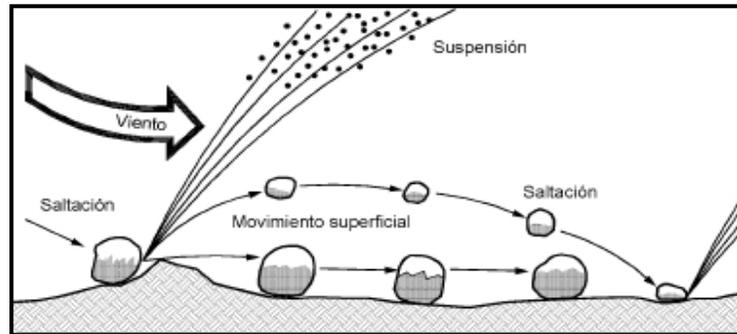


Figura 4.4 Mecanismo de erosión por acción del viento.  
Fuente: Suárez (2001).

Por acción del agua se ocasiona la **erosión hídrica** que en la actividad de planificación de cierre de mina es una de las más importantes por los efectos que ésta produce. Al disgregarse las partículas superficiales, éstas son arrastradas por la acción del agua y depositadas en los cursos aledaños, aguas abajo de los yacimientos.

La mecánica de la erosión hídrica incluye tres (3) procesos básicos: (ver figura 4.5)

1. Desprendimiento de las partículas.
2. Transporte de las partículas desprendidas.
3. Depósito o sedimentación.

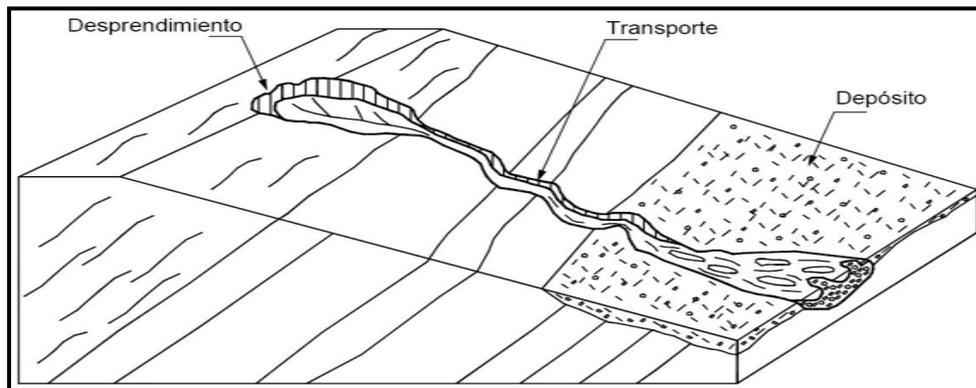


Figura 4.5 Proceso de erosión.  
Fuente: Suárez (2001).

La erosión hídrica tiene su origen principalmente en la lluvia y cuando esta erosión se realiza por golpeo de la lluvia se denomina salpique (*Splash erosion*). Éste ocurre por

el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo (ver figura 4.6). Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. Estas partículas son luego transportadas por la escorrentía. Al caer una gota de lluvia levanta partículas de suelo y las reparte en un área de aproximadamente un (1) metro cuadrado. Parte de la lluvia se infiltra en el subsuelo y parte fluye sobre la superficie del terreno.

De acuerdo con Suarez (2001), en un suelo sin protección vegetal se calculan hasta cincuenta metros cúbicos de suelo removido por hectárea ( $50\text{m}^3/\text{ha}$ ) en una lluvia fuerte de una hora de duración. La erosión es una función del poder erosionante del agua y de la erosionabilidad del suelo. La erosión causada por la lluvia está determinada por la cantidad, intensidad y duración de la misma. Cuando la intensidad y cantidad de lluvias es alta la erosión será más rápida. La erosividad de la lluvia ha sido definida por Colotti (2003) como la agresividad con la cual las gotas de lluvia son capaces de impactar el suelo, producir salpique y arrastre.

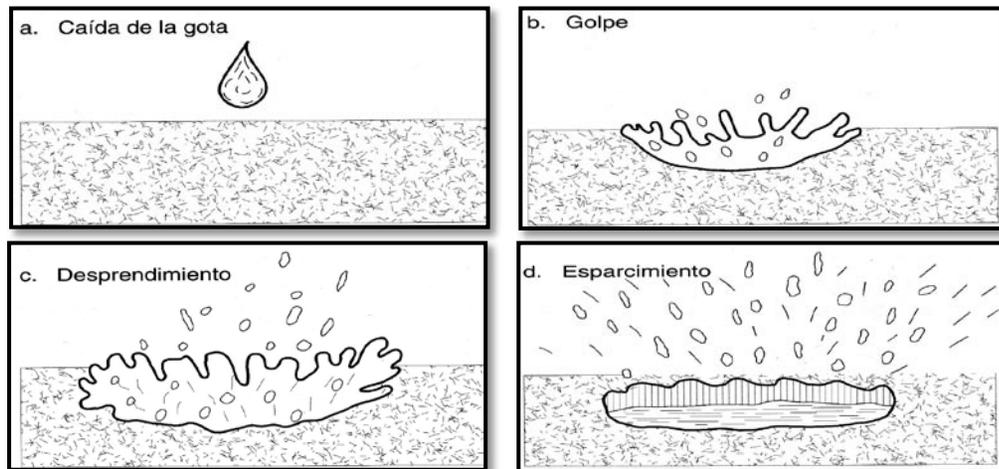


Figura 4.6 Erosión por golpe de una gota de lluvia.  
Fuente: Modificada de Suárez (2001).

Según la forma de presentarse, la erosión hídrica puede clasificarse en: laminar, en surcos y en barrancos o cárcavas.

La *erosión laminar* se manifiesta por la remoción uniforme de delgadas capas de suelo que se profundizan en áreas grandes, como consecuencia de la disgregación de los agregados del suelo por acción de los impactos de las gotas de lluvia y la escorrentía (ver figura 4.7). El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible. Este tipo de erosión es muy común en los suelos residuales y en las zonas recientemente deforestadas.

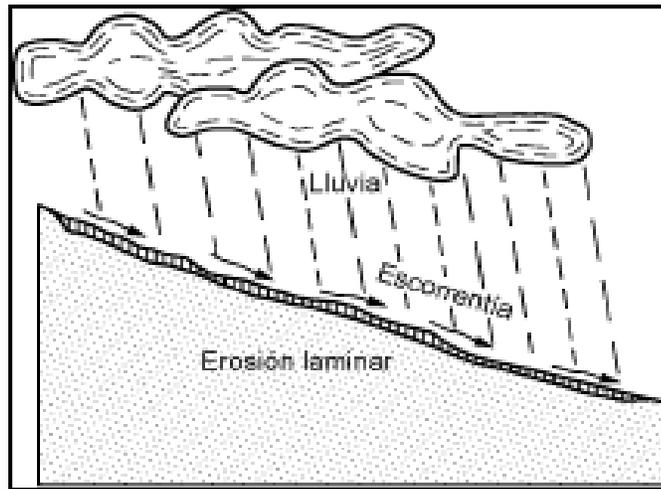


Figura 4.7 Proceso de erosión laminar.  
Fuente: Suárez (2001)

La acción de las gotas de lluvia altera el suelo superficial. El agua parcialmente se infiltra y parcialmente se acumula sobre la superficie del terreno formándose una capa delgada de agua con flujos de 2 a 3 mm de espesor. El flujo laminar es poco profundo en la cresta de la ladera pero la profundidad de flujo aumenta talud abajo. El flujo propiamente laminar tiene poco poder erosivo pero en partes se convierte en turbulento, aumentando en forma importante su capacidad de erosión. Al continuar la acción de la lluvia y al mismo tiempo ocurrir el flujo, éste se hace turbulento, aumentando la capacidad de erosión. El agua toma un color marrón o amarillo por la presencia de sedimentos.

Gaspieri (1983) afirma que, por lo general, el horizonte superficial afectado por este tipo de erosión es el más rico en nutrientes y en materia orgánica, lo cual lleva implícito una disminución de la fertilidad y capacidad de retención de humedad de los suelos. La

erosión laminar es de carácter selectivo en lo referente al tamaño de las partículas, pues en primer término son arrastradas aquellas de menor tamaño y menor densidad, arcilla, limo y materia orgánica.

La **erosión en surcos** ocurre cuando el flujo (caudal) superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural. Al concentrarse el flujo en pequeñas corrientes, sobre una pendiente, se genera una concentración del mismo, y por la fuerza tractiva (tracción) de la corriente se produce erosión, formándose pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son prácticamente imperceptibles pero, poco a poco, se van volviendo más profundos. En estos surcos, la energía del agua en movimiento adquiere, cada vez, una fuerza mayor capaz de desprender y transportar partículas de suelo. Inicialmente, los pequeños canales presentan una forma en V, la cual puede pasar a forma en U (ver figura 4.8).

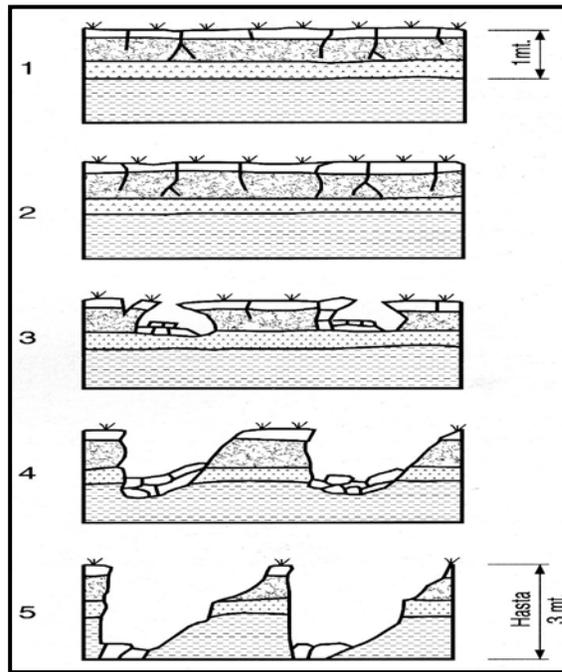


Figura 4.8 Proceso de formación de surcos y cárcavas.  
Fuente: Suárez (2001).

La profundidad del canal va aumentando y estos flujos adquieren velocidades cada vez mayores. La energía de este flujo concentrado empieza a desprender partículas de suelo incorporándolas al mismo. La erosión aumenta cuando el espesor del flujo es

muy cercano al diámetro de las gotas de lluvia (0,5 a 5 mm) y se convierten estos microflujos concentrados en las rutas preferenciales de los sedimentos. Las partículas de suelo son removidas por el golpeo de la lluvia y transportadas por el flujo, aún con pendientes muy pequeñas. El agua dentro del surco presenta considerable turbulencia y puede erosionar partículas relativamente grandes.

Suárez (2001) también afirma que la erosión en surcos es la causante del mayor porcentaje de producción de sedimentos sobre la superficie de la tierra. La mayor parte del volumen total de sedimentos transportados por procesos erosivos ocurre en forma de surcos, después de la acción del golpeo de la lluvia. La acción de golpes de la lluvia y el flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente, forma inicialmente microsurcos de erosión (*rills*) y a medida que la longitud de flujo es mayor, los surcos se hacen más profundos y de menor densidad por unidad de área.

Cuando los surcos se hacen más profundos y más anchos se dice que los surcos se convierten en cárcavas. Si los canales de erosión tienen profundidades menores que 30 cm se les clasifica como surcos y si la profundidad es mayor que 30cm, como cárcavas. Los surcos pueden eliminarse con rastrillado y siembra de vegetación. Las cárcavas requieren de obras más complejas de ingeniería. Por lo general, requieren reperfilado (reperfilaje) del terreno.

La **erosión en cárcavas** se produce al profundizarse y ampliarse los surcos de erosión o varios pequeños surcos puede unirse y crecer para formar una cárcava.

Se denomina cárcava a un canal de erosión con una sección superior a  $0,09\text{m}^2$  (1 pie<sup>2</sup>). Las cárcavas tienen una mayor capacidad de transporte de sedimentos que los surcos, debido a que las tasas de flujo son mayores. Las cárcavas son canales mucho más largos que los surcos. Estos canales transportan corrientes concentradas de agua, durante e inmediatamente después, de las lluvias. Las cárcavas van avanzando o remontando hacia arriba formando una o varias gradas o cambios bruscos de pendiente. Las áreas más susceptibles a este tipo de erosión son aquellas de topografía de alta pendiente y mantos de

suelo de gran espesor. Así mismo, la eliminación de la cobertura vegetal o la destrucción de la estructura del suelo, por remoción de la capa protectora superficial, expone el suelo a la erosión.

De acuerdo con Suárez (2001), aunque el volumen total de pérdidas de suelo en el mundo debida a la erosión en cárcavas es comúnmente menor que la debida a la erosión laminar y en surcos, los daños asociados con la erosión en cárcavas pueden ser mucho más significativos y los riesgos para las vidas humanas pueden ser mayores. Las cárcavas no son tan significativas como los surcos en términos del total de sedimentos que se producen pero, son mucho más destructivas en términos de daño a estructuras, etc.

Se pueden identificar cuatro (4) tipos de cárcavas:

Cárcava continua alargada: No tiene cabeza con escarpe vertical importante. Generalmente, las partículas erosionadas son las arenas finas y los limos, permaneciendo en la cárcava las partículas de mayor tamaño; está asociada frecuentemente con paisajes suavemente ondulados.

Cárcava alargada con escarpe vertical superior: Ocurre en suelos cohesivos o con coberturas de raíces; es retrogresiva, con avance y fallas de los taludes resultantes, por esfuerzo al corte o volteo.

Cárcava ancha: es muy común en cortes de excavaciones para carreteras y ferrocarriles. El corte inicial es un talud con una determinada pendiente. El agua al correr sobre el talud genera una serie de surcos y pequeñas cárcavas, dentro de una cárcava más ancha, que comprende una sección grande del corte. La formación de una cárcava ancha es muy común en suelos residuales donde el material más superficial del perfil generalmente es más erosionable y que al profundizarse, la resistencia a la erosión aumenta.

Cárcava ramificada: Ocurre, con alguna frecuencia, que las cárcavas alargadas formen cárcavas laterales creando un sistema de ramificación de la cárcava. Esta

ramificación genera un proceso muy fuerte de denudación con generación de grandes cantidades de sedimentos para las corrientes.

Suárez (2001) plantea que controlar la erosión en cárcavas es difícil pero, si se logran distribuir las corrientes y evitar las concentraciones de grandes flujos se disminuye en forma importante la posibilidad de ocurrencia de cárcavas. Hasta ahora el método más efectivo para el control de cárcavas es la revegetación con estructuras que favorezcan su crecimiento. Puede ser necesario usar métodos mecánicos, mallas, fibras vegetales, como yute y fique, piedra o madera, para controlar provisionalmente la erosión mientras se establece la vegetación.

### **Transporte de sedimentos**

La carga transportada por ríos naturales puede dividirse en tres componentes:

***Carga de fondo:*** es el material demasiado grueso para ser soportado dentro del flujo de agua por un periodo apreciable de tiempo. El transporte de fondo, incluye todos los tamaños de sedimentos mayores de 0.064 mm transportados por el agua. La carga de fondo puede moverse rodando, deslizándose o a saltos a velocidades menores que aquellas del flujo alrededor.

***Carga en suspensión:*** las partículas suspendidas son transportadas y mantenidas dentro del flujo por un proceso de mezcla turbulenta. La carga en suspensión consiste en partículas de diámetro menor a 0.064 mm., las cuales se transportan suspendidas dentro del flujo.

***Carga disuelta:*** la carga disuelta consiste en materiales transportados en solución. Generalmente, se trata de partículas de arcillas o limos muy finos. La carga total de sedimentos es la suma de las tres cargas anteriores.

## **La erodabilidad de los suelos**

En lo relativo a la vulnerabilidad a la pérdida de suelos, como sustrato para la revegetación, se tiene la erosionabilidad o erodabilidad, la cual se define como la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos.

Según Suárez (2001), la erosionabilidad depende de las propiedades del suelo y del agua y. se cuantifica por medio de tres (3) factores: dispersión de las arcillas, erosión propiamente dicha y granulometría del suelo. Además, los factores básicos que definen la erosionabilidad de un suelo son:

- a) Tamaño y distribución de las partículas
- b) Resistencia al corte (cohesión)
- c) Índice de plasticidad
- d) Contenido de arcilla
- e) Porcentaje de arena, limo y arcilla
- f) Tipo de arcilla
- g) Dispersibilidad de la arcilla
- h) Valencia de los iones absorbidos
- i) Tamaños de los iones absorbidos
- j) Porcentaje y tipo de los suelos disueltos
- k) Temperatura
- l) Orientación de las partículas
- m) Factores geométricos (estado de esfuerzos)
- n) Humedad natural antes de la lluvia
- o) Área expuesta
- p) Intensidad de la lluvia
- q) Pendiente del terreno
- r) Tasa de escorrentía
- s) Profundidad de la escorrentía
- t) Velocidad de la escorrentía

- u) Longitud de recorrido de la escorrentía
- v) Características de la cobertura vegetal

La erosionabilidad es una propiedad cuyas causas específicas son muy complejas y dependiendo de las características del fenómeno, en cada sitio, algunos de los factores indicados tienen importancia muy superior a otros.

Para suelos granulares (arenas y gravas) las fuerzas que resisten el movimiento son causadas principalmente por el peso propio de las partículas. Los suelos finos (arcillosos) en cambio deben esta fuerza generalmente a la cohesión.

### **Tendencias generales de la erosionabilidad**

Como tendencia general de la erosionabilidad se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Es baja en gravas gruesas bien gradadas
- Es alta en limos y arenas finas uniformes
- Disminuye con el aumento del contenido de materia orgánica
- Aumenta al aumentar la relación de vacíos
- Aumenta con el incremento del contenido de iones de Na
- Aumenta al aumentar la pendiente del talud

### **La erosionabilidad y el tipo de arcilla**

De acuerdo con Suárez (2001) la erosión ocurre cuando las partículas de arcilla entran en suspensión en la corriente de agua. La mayoría de las fallas importantes de taludes por erosión han ocurrido en arcillas con baja a mediana plasticidad (CL y CL-CH) que contienen algo de montmorillonita.

La erosionabilidad depende principalmente de las características de la estructura incluyendo la presencia de arenas, limos, la mineralogía de las arcillas (en especial la

presencia de montmorillonita o illita, así sea en pequeñas cantidades) y la presencia de iones intercambiables.

El origen mineralógico de la arcilla especifica el grado de actividad. Las caolinitas son relativamente inactivas y muestran poca habilidad para absorber agua y expandirse. Las arcillas de tres (3) capas muestran significativa actividad superficial debido a la gran sustitución isomorfa y la habilidad para absorber aguas, especialmente las montmorillonitas; las illitas presentan mayores fuerzas de atracción entre las partículas debidas a los iones de K presentes y su potencial de expansión es reducido. La facilidad de expansión trae como consecuencia una mayor susceptibilidad a la erosión.

En los últimos años se ha logrado entender muy claramente que hay cierto tipo de arcillas que son muy erosionables. El factor «tipo de arcilla» es el más importante. Existen ensayos sencillos con los cuales se puede determinar el tipo de arcilla presente en un suelo y con esto obtener un valor de nocividad que es una medida indirecta de erosionabilidad. Uno de estos es el Ensayo de Azul de Metileno.

### **Ensayo de Azul de Metileno**

El ensayo de azul de metileno permite determinar la fracción arcillosa de una muestra e identificar la nocividad de un material sin tener que recurrir a otros métodos más laboriosos y costosos. Este consiste en realizar una titulación química, pues se aprovecha el hecho de que sólo los coloides del suelo adsorben el azul de metileno y por lo tanto es muy sencillo determinar la superficie específica de éstos. Más especificaciones de este método están contenidas en el anexo 4.

### **Control de erosión y sedimentación**

Ayala y Vadillo (1995) expresa que las medidas aplicables para controlar el proceso de erosión y posterior sedimentación de las áreas intervenidas por actividades mineras se concentran en el modelado, diseño y construcción de obras de drenaje, desagüe y sedimentación. Estas medidas tienen como objetivos: conducir los excesos de agua que se presentan durante las lluvias por los lugares adecuados, para evitar la

elevación del nivel freático y la afectación de la estabilidad de los taludes de las excavaciones y escombreras.

Estas medidas comienzan por la estimación cuantitativa de valores para el diseño:

**Cálculo de caudales a desaguar (caudales de diseño):** una etapa básica, en cualquier proyecto de restauración, es la determinación del caudal máximo a desaguar dentro de las zonas recuperadas que servirán de punto de partida para el dimensionamiento de las obras de drenaje. Esos caudales se determinan para cuencas pequeñas, como suelen ser las que se recuperan de los terrenos afectados por las actividades extractivas, a partir de las fórmulas teóricas: la de Richards y la Racional.

♣ Fórmula de Richards :

$$Q = \frac{1}{2} * (C * I * S / 360)$$

♣ Fórmula Racional:

$$Q = (C * I * S / 360) * K$$

Donde:

Q = caudal, en m<sup>3</sup>/s

C = coeficiente de escorrentía (adimensional)

S = área, en ha

I = intensidad de precipitación, en mm/h

K = factor de corrección en cuencas pequeñas (se puede asumir constante e igual a 1,2).

**Cálculo del tiempo de concentración (Tc):** que es el tiempo necesario para que el agua escurra desde el punto más distante de la cuenca hasta el punto de medición, llamado sitio de concentración de la cuenca. Este valor depende de la trayectoria que debe recorrer el agua o sea, de la longitud que debe desplazarse el agua hasta el sitio de medición y de la velocidad promedio que puede alcanzar en este trayecto. Esta velocidad va a ser determinada en función de la textura superficial y por el declive del terreno.

El tiempo de concentración puede ser calculado mediante la suma de:

$$T_{cs} + T_v$$

Donde:

$T_{cs}$ : tiempo de escurrimiento o recorrido sobre laderas y/o planicies, o sea el tiempo de concentración superficial hasta alcanzar el curso de agua más cercano.

$T_v$ : tiempo de viaje a través de los cauces hasta el sitio de concentración.

Entonces,  $T_{cs}$  es proporcional a la pendiente media de la ladera y puede calcularse mediante:

$$T_{cs} = \Delta L / [M * (\Delta H / \Delta L)^{1/2}]$$

Donde:

$T_{cs}$ : tiempo de concentración superficial, en min

$\Delta L$ : distancia de recorrido superficial, en m

$\Delta H$ : desnivel, en m

M: coeficiente en función del tipo de cobertura vegetal (ver tabla 4.1).

El escurrimiento, al alcanzar cualquier curso de agua que se encuentra a su paso, se considera que comienza desde que inicia el viaje hasta que llega al punto de concentración, éste se estima mediante la expresión:

$$T_v = 0,0195 * (L^3 / H)^{0,385}$$

Donde:

$T_v$ : tiempo de viaje, en min

L: longitud del recorrido en el cauce, en m

H: desnivel del cauce, en m

*Tabla 4.1. Valores de M para diferentes coberturas superficiales.*

<b>Tipo de cobertura</b>	<b>M (m/min)</b>
Bosque húmedo tropical	50
Cultivos terraceados, pastos altos	100
Pastos cortos	140
Cultivos en hileras	180
Ninguna vegetación	200

Fuente: Pinilla (1999)

El coeficiente de escorrentía (C) expresa la proporción total de lluvia que discurre; éste depende de la cantidad de vegetación en la cuenca, de la configuración topográfica del terreno y de la permeabilidad del suelo. Al agua que logra llegar a los cauces, después de descontar las cantidades retenidas, infiltradas o evaporadas, se le denomina lámina de agua o lluvia efectiva y es la que, en definitiva, produce los aportes de agua que llegan al punto de concentración. En la tabla 4.2 se muestran valores de C para diferentes condiciones de cobertura vegetal, permeabilidad del suelo y su pendiente.

Cuando no se requieren valores muy estrictos en el cálculo del tiempo de concentración, éste puede ser también obtenido mediante el uso del gráfico de la figura 4.9.

Con fines de diseño preliminar, Pinilla (1999) realizó un gráfico (ver figura 4.10) para determinar los valores de caudal máximo que pudiera presentarse en el CFSI. El mismo fue realizado considerando diferentes extensiones de cuencas particulares y considerando las precipitaciones con un período de 10 años.

Tabla 4.2. Valores de C según propiedades del terreno

Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente del Terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		$\geq 50\%$	20 %	5 %	$\leq 1\%$	
Sin vegetación	1	0,80	0,75	0,70	0,63	0,60
	2	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	3	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	1	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	2	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	3	0,40	0,35	0,30	0,45	0,20
Pastos, vegetación ligera	1	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	2	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	3	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba, grama	1	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	2	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	3	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosques, vegetación densa	1	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	2	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	3	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05
Notas	1: impermeable 2: semipermeable 3: permeable		Para zonas con probabilidad de ser quemadas aumentar los coeficientes de la siguiente manera: Cultivos: multiplicar por 1,10; el resto: multiplicar por 1,30.			

Fuente: Pinilla (1999)

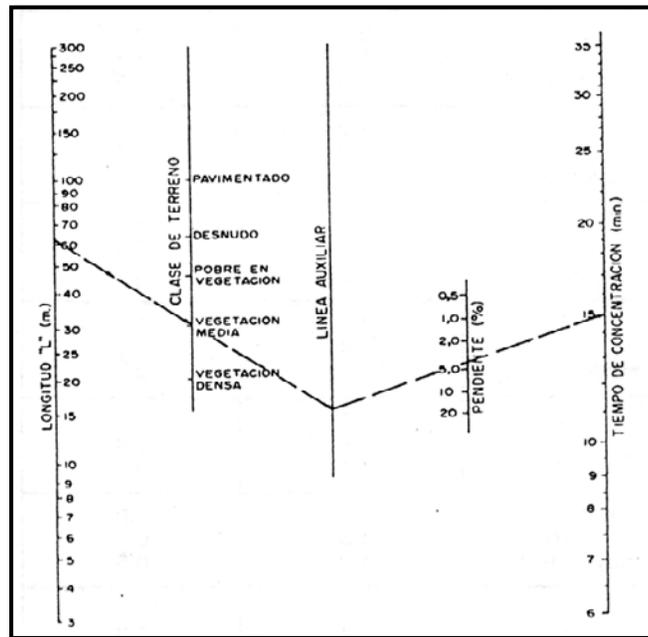


Figura 4.9 Nomograma para el cálculo del tiempo de concentración.

Fuente: Ayala y Vadillo (1995)

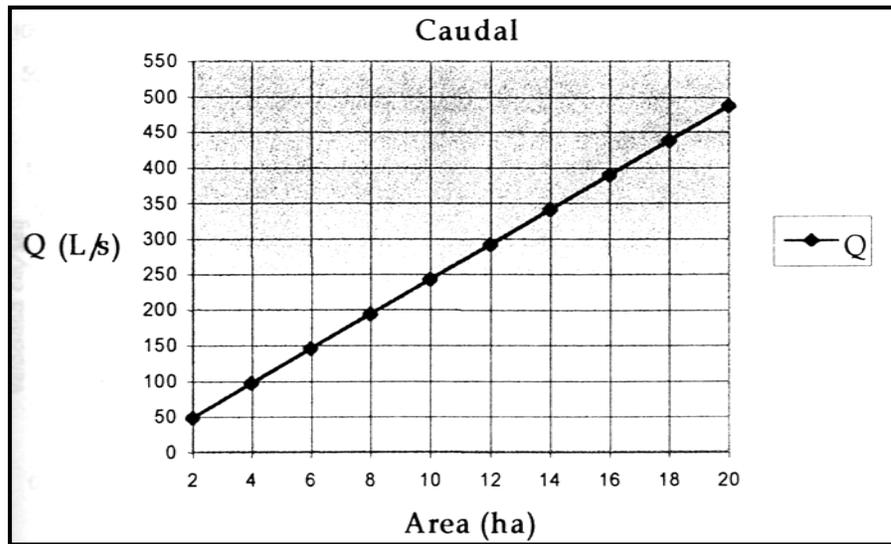


Figura 4.10 Gráfico para estimación de caudal máximo en el CFSI.

Fuente: Pinilla (1999)

Una vez que se ha calculado el caudal máximo, es necesario dimensionar las obras por donde serán conducidas las aguas. Estas obras hidráulicas pueden ser: canales y diques.

**Diseño de canales y diques:** el control de las aguas de escorrentía en las operaciones mineras se puede resolver, en parte, mediante la utilización de diques y canales excavados. Las funciones de estas obras son:

- ♣ Evitar el paso de las aguas a áreas fuertemente erosionables, o en operación, y conducirlos de manera adecuada.
- ♣ Reducir la longitud de los taludes para complementar la resistencia a la erosión aportada por la vegetación.
- ♣ Impedir la acumulación de agua en superficies irregulares y/o cóncavas
- ♣ Eliminar la llegada de las aguas a zonas de edificaciones o instalaciones mineras, y
- ♣ Proteger las tierras bajas frente a la decantación de sedimentos.

Previo al estudio hidráulico de estas obras, es necesario establecer su naturaleza, es decir, los materiales de las paredes y fondo, así como su sección o forma geométrica en sentido perpendicular al flujo. Los canales pueden ser construidos sobre los estériles, en tierra, con césped, en piedra, con hormigón, entre otros.

Diseño de canales para desagüe: El cálculo hidráulico de la sección mínima del canal colector principal de desagüe puede realizarse utilizando dos (2) ecuaciones básicas:

En primer lugar,

$$Q = V * A$$

Donde:

Q: caudal o descarga máxima estimada, en m<sup>3</sup>/s

V: velocidad mínima para evitar la obstrucción del canal por sedimentación, en m/s

A: área de la sección mínima para el manejo del caudal, en m<sup>2</sup>.

Y luego, la velocidad mínima, que puede calcularse mediante la ecuación:

$$V = 1/n * R^{2/3} * i^{1/2}$$

Donde:

V: velocidad del agua, en m/s

i: pendiente longitudinal del canal, (adimensional)

n: número de Manning, (adimensional)

R: radio hidráulico, en m.

El radio hidráulico de un canal representa la relación que existe entre el área mojada y el perímetro mojado. El número de Manning, según el tipo de revestimiento, se indica en la tabla 4.3.

La velocidad mínima también puede estimarse mediante la utilización de ábacos (ver figura 4.11) que presentan la relación del tamaño de las partículas con la velocidad necesaria para su erosión, transporte y sedimentación.

Tabla 4.3. Número de Manning, según el tipo de revestimiento.

Tipo de revestimiento	n
Tierra ordinaria con superficie uniforme	0,02
Hierba (altura de la lámina de agua superior a 15 cm)	0,04
Hierba (altura de la lámina de agua inferior a 15 cm)	0,06
Hierba espesa	0,10
Empedrado rugoso	0,04
Empedrado liso	0,02
Hormigón rugoso	0,024
Hormigón liso	0,012

Fuente: Ayala y Vadillo (1995)

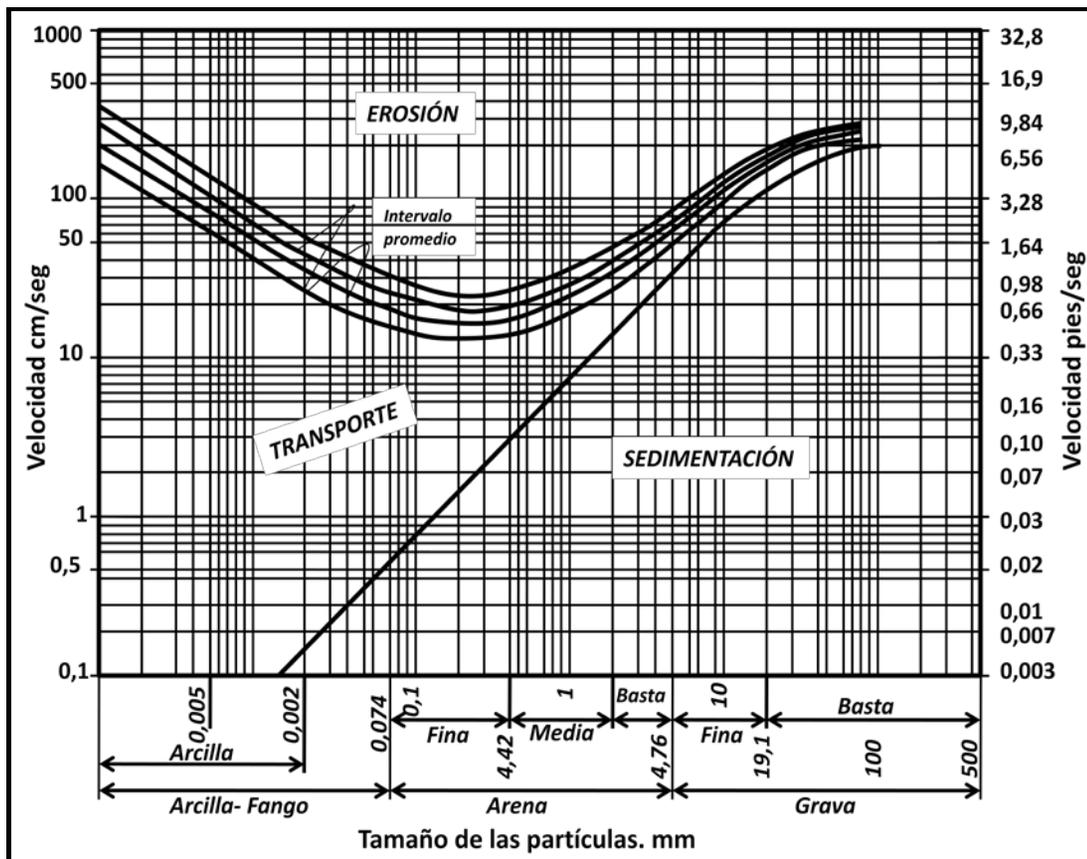


Figura 4.11 Relación del tamaño de grano de la partícula con la velocidad necesaria para su erosión, transporte y sedimentación.

Fuente: Krynine y Judd (1975).

Las geometrías más utilizadas para secciones de canales de desagüe son: trapezoidales, triangulares y parabólicas. La sección depende del caudal, la velocidad

máxima de circulación del agua, e indirectamente de la maquinaria minera disponible por la obstrucción de los mismos.

Independientemente del cálculo hidráulico que debe realizarse, algunos criterios generales de diseño para canales son:

- ♣ Según la zona que se pretenda proteger, se utilizará el período de recurrencia de 10 a 50 años.
- ♣ El ancho de los canales, para el diseño máximo, será como mínimo de 1,2 m.
- ♣ Los taludes no serán inferiores a 2H:1V
- ♣ Periódicamente se revisarán, y si fuese necesario, se retirarán los sedimentos depositados.

En cuanto a los diques, el objetivo básico de funcionamiento es la canalización de las aguas hasta las lagunas de sedimentación. Existen tres (3) tipos principales de diques: los de desviación, los de interceptación y los perimetrales.

Los criterios de diseño para estas obras son los siguientes:

- ♣ El área por cada dique no debe ser superior a dos (2) ha.
- ♣ El espaciamiento medio entre diques debe ser, al menos, el que se indica en la tabla 4.4.
- ♣ La vida útil de los diques es limitada y por lo general, no es superior a los dos (2) años.
- ♣ El material de construcción debe ser adecuadamente compactado, formando taludes laterales de 2H:1V
- ♣ Los diques deben ser revegetados, mediante siembra, 15 días antes de su instalación.
- ♣ La altura mínima debe ser de 50 cm y la altura de coronación, al menos, de 60 cm.

*Tabla 4.4 Espaciamiento medio entre diques*

Talud por encima del dique (%)	Distancia entre diques (m)
10	45
5 – 10	60
5	90

Fuente: Ayala y Vadillo (1995)

**Diseño de lagunas de sedimentación:** éstas son las siguientes estructuras que son empleadas para controlar la erosión hídrica. Estas estructuras son necesarias para complementar un buen sistema de drenaje a ser implementado en la mina. Durante la vida útil de la mina siempre habrá superficies expuestas a la acción de las aguas y el viento, y como consecuencia, estos materiales serán transportados aguas abajo.

Ayala y Vadillo (1995) indican que la ubicación de estas estructuras suele elegirse aguas abajo y en las proximidades del área donde se realizan las actividades extractivas o el vertido de los estériles.

Una forma de construir lagunas de sedimentación es con la construcción de presas de tierra compactada, incluso zonadas. No obstante, el tipo más común y sencillo de construir es el de la escollera, en donde el material que lo conforma consiste en fragmentos de roca sana, obtenidas de canteras mediante voladura de rocas (Terzaghi 1972, en Pinilla 1999).

Su función principal es permitir la retención y decantación de los sólidos transportados por el agua de drenaje, antes de verterlas en el cuerpo de agua receptor. Las partículas más gruesas decantan más rápidamente que las partículas finas, de modo que la cuenca puede ser dimensionada en función de la granulometría del material transportado. La velocidad de decantación de una partícula en el agua se estudia mediante la mecánica de fluidos y puede ser expresada por la Ley de Stokes:

$$V_{\text{sed}} = [g/(18 * \mu)] * (s-1) * D^2$$

Donde:

$V_{sed}$  = velocidad de sedimentación, en cm/seg

$g$  = aceleración de gravedad, igual a  $981\text{cm/s}^2$

$\mu$  = viscosidad del fluido, en  $\text{cm}^2/\text{s}$

$s$  = densidad de la partícula (adimensional)

$D$  = diámetro de la partícula, asumida esférica, en cm

Se produce sedimentación en la cuenca cuando el tiempo de residencia de las partículas es suficiente para permitirla. El tiempo de residencia ( $t_r$ ) depende del caudal afluente (asumido, por razones de simplificación, igual al efluente) y del volumen de la cuenca, es decir:

$$t_r = \text{vol} / Q$$

Donde:

$t_r$  = tiempo de residencia, en s

vol = volumen de la cuenca, en  $\text{m}^3$

$Q$  = caudal del afluente, en  $\text{m}^3/\text{s}$

Entonces, sustituyendo el tiempo de residencia y llamando  $A_{sed}$  al área de la laguna de sedimentación:

$$V_{sed} = p / t_r = p / (\text{vol}/Q) = p / ((A * p)/Q) = Q / A$$

Por lo tanto:

$$A_{sed} = Q / V_{sed}$$

Donde:

$A_{sed}$  = área de la laguna de sedimentación, en  $\text{m}^2$

$Q$  = caudal del afluente, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$V_{sed}$  = velocidad de sedimentación, en m/s.

De manera que, el área de la laguna de sedimentación no depende de la profundidad y es el cociente del caudal afluente por la velocidad de sedimentación. La capacidad de

esta estructura debe ser tal que pueda albergar el agua proveniente de una lluvia, a la intensidad establecida, durante un período de tiempo de 60 min y con período de retorno de, al menos, 10 años.

### **Otras estrategias de control de erosión hídrica**

En la literatura técnica actualizada se promueve la utilización de otras estrategias para el control de la erosión hídrica, en áreas intervenidas por distintos usos, como las siguientes:

**Reperfilado de taludes:** los taludes de las escombreras y áreas de disposición de materiales granulares sueltos, fácilmente disgregables, deben ser modelados con perfiles geométricos que garanticen la estabilidad y minimicen la erosión hídrica, por agua de escorrentía, con régimen turbulento.

**Desagüe de taludes:** para prevenir la erosión de las superficies, el desagüe de los taludes requiere de obras permanentes, con la construcción de: torrenteras y bajantes de asfalto u hormigón, y de obras provisionales, con bajantes como: de tubería flexible, de lámina plástica, de tubos abiertos. Los bajantes se utilizan en combinación con los diques de desvío que tienen la función de canalizar las aguas y con las tanquillas al final de los mismos.

**Protección de desagües:** en los puntos de descarga de los distintos tipos de canalización se emplean protecciones, con la doble finalidad de disipar la energía del agua y evitar la erosión de las zonas entre los desagües y los canales, aguas abajo. Las tanquillas, estanques, sumideros, entre otras, son usadas para romper cargas hidráulicas, a continuación de los bajantes.

**Protección de bermas:** las bermas o terrazas de las escombreras diseñadas sobre el material compactado sirven para controlar la erosión de las aguas que discurren de los taludes y para permitir la sedimentación de los sólidos transportados. Esto se logra

con canales revestidos con materiales rugosos, con resaltos, al embutir en concreto pobre: trozos de cauchos, piedra picada, o con vegetación resistente en el fondo de los canales.

**Protección de sumideros:** las obras están constituidas por filtros o áreas de decantación excavadas alrededor de los sumideros. Tienen como objetivo evitar la entrada de sedimentos en las canalizaciones de desagüe, que pudieran producir la obstrucción de los mismos o reducir su capacidad.

**Difusores laminares:** son obras construidas en zonas sensiblemente horizontales, donde el agua recogida puede distribuirse a una velocidad inferior a la del umbral de erosión sobre un área no alterada y protegible con una cubierta vegetal.

**Barreras:** son obras provisionales construidas de distintas formas y con materiales diversos, orgánicos e inorgánicos. Los objetivos de estas barreras consisten en contener los sedimentos producidos por erosión, en lugares establecidos, antes de que el agua ingrese a los drenajes naturales, o artificiales, y reducir la energía de las aguas de escorrentía que atraviesan.

**Cubiertas:** están constituidas por materiales, fibras o polímeros, que restringen el arrastre de sólidos en laderas, refuerzan los suelos granulares sueltos, permiten la fijación y colonización de semillas o bulbos de plántulas, con fines de revegetación.

Los materiales que son utilizados para controlar la erosión son diversos. En la tabla 4.5 se presenta un resumen con distintos materiales, de acuerdo con sus características físicas y su función, separando los productos sintéticos de los orgánicos.

## Materiales para el control de la erosión

Los materiales que son utilizados para controlar la erosión son diversos, en la tabla 4.5 resumen, de acuerdo con su composición, separando los productos sintéticos de los orgánicos.

*Tabla 4.5 Materiales para control de erosión*

<b>Material</b>	<b>Tipo</b>	<b>Características</b>
Los geosintéticos (son fabricados con polímeros y se colocan en contacto con el suelo)	Geomembranas	Capas delgadas de caucho o materiales plásticos, utilizados principalmente como impermeabilizantes.
	Geotextiles	Textiles permeables o redes de plástico, utilizados como separadores de capas de suelo, como refuerzo o como filtro. Son poco resistentes al sol. Su durabilidad a largo plazo es desconocida.
	Geomallas	Son mallas con orificios de gran tamaño, utilizados como refuerzo de suelo pero, también se les usa como separadores entre capas de materiales gruesos.
	Geocompuestos	Son combinaciones de geomembranas, geotextiles y geomallas.
	Mantos ( <i>Synthetic erosion control blankets</i> )	Textiles fabricados con fibras y filamentos sintéticos estabilizados contra la acción de los rayos ultravioleta.
	Esterillas tridimensionales ( <i>Turf reinforcement mats</i> )	Son esterillas de alta resistencia, flexibles, con una matriz tridimensional de nylon, polietileno, polipropileno o PVC. Son resistentes a altas velocidades y están recomendadas para recubrimiento de canales.
	Matriz de hilos	Material de alta resistencia permeable y flexible que se utiliza para construir muros de contención y revestimientos.
	Fibras sintéticas sostenidas por un pegante	Es una capa de fibras sintéticas, colocadas con aire comprimido y después de extendidas se les coloca pegante. El resultado es una capa sobre la cual luego se puede establecer vegetación.

**Continuación tabla 4.5 Materiales para control de erosión**

Los textiles orgánicos (son fabricados con fibras como fique, yute o coco)	Tejidos orgánicos	Son de fibra gruesa. Su principal ventaja es la capacidad de absorción de agua. Se pueden utilizar solos, para proteger semillas y facilitar el establecimiento de la vegetación.
	Mantos orgánicos ( <i>Blankets</i> )	Son delgados, fabricados con máquina, utilizando compuestos orgánicos biodegradables (paja, viruta de madera, fique, fibra de coco o una combinación de ellas).
Fajinas prefabricadas (son rollos atados de fibras generalmente orgánicas, amarradas con fibras sintéticas u orgánicas)	Rollos de paja ( <i>Straw rolls</i> )	Son de paja empacada en redes de tejidos plásticos. Se colocan por medio de estacas en los taludes. Su función es capturar y retener los sedimentos y son útiles para la estabilización temporal, reduciendo la erosión laminar y en surcos.
	Rollos de fibra de coco ( <i>Coir rolls</i> )	Se utilizan para controlar la erosión en surcos y cárcavas, en taludes y para la formación de raíces en obras de bioingeniería. Su alta resistencia permite en algunos casos reemplazar los enrocados.
Barreras de sedimentos	Bolsas de arena	Son bolsas de geotextil rellenas con arena. Se utilizan para retener sedimentos o para la contención de agua.
	Barreras de geotextil ( <i>Silt fences</i> )	Son barreras temporales de sedimentos construidas con barreras permeables. Se colocan interceptando los flujos concentrados efímeros de agua.
	Otras barreras prefabricadas	Tubos sintéticos, camisas porosas, bolsas de filtros, tanques sedimentadores o filtrantes.
Los filtros granulares	El material de filtro es un material natural o sintético que debe cumplir con la condición de prevenir la migración de las partículas de un suelo que se debe proteger y al mismo tiempo permitir el paso del agua.	
<i>Mulching</i> y protectores de la vegetación	El <i>mulching</i> es un material o capa de paja u otro material que se utiliza para proteger las semillas o la vegetación durante el proceso de germinación. No es recomendado en suelos arenosos de erosividad alta, en pendientes muy altas (superiores a 2,5H:1V) en áreas de intensidad muy fuerte de las lluvias.	
Barreras vivas Sistema vetiver u otro	El sistema se basa en el uso de plantas vivas de vetiver ( <i>Chrysopogon zizanioides</i> ), gramínea perenne de la Poaceae, nativa de la India, que puede crecer hasta 1,5m de altura y forma mazos. Las raíces pueden profundizar entre 2 y 4m. En la bioingeniería ha resultado una alternativa a las obras civiles convencionales para la protección de taludes en carreteras, lagunas, terraplenes y canales, tanto por su alta eficiencia, como por sus costos reducidos en comparación con otras prácticas.	

Fuente: Suárez (2001)

### 4.5.3 Prácticas de revegetación

Hasta esta sección la estabilización de taludes y el control de erosión han sido descritos en detalle. El proceso de cierre de mina requiere la recuperación de sustratos para actividad biológica en los pisos y frentes minados y de las escombreras, en aquellos lugares que serán previstos para revegetación.

Se tiene la necesidad de establecer condiciones viables para los microorganismos del suelo, a partir de la disponibilidad de nutrientes, oxígeno, e infiltración del agua. En consecuencia la caracterización de minerales, suelos y rocas, *in situ* y transportados, en equilibrio estable, es fundamental para la adopción de criterios técnicos en las prácticas de revegetación de áreas afectadas, indicando a su vez los requerimientos de escarificación, de abono, de riego, en fin, de protección de la colonización de especies vegetales para el uso futuro seleccionado.

Según Nuñez (2000; p.5), la teoría y la práctica agroecológicas han venido evolucionando en los últimos años, ofreciendo un nuevo paradigma para una agricultura sustentable. Sus principios elementales, técnicas y métodos pueden orientar la transformación de las prácticas agrícolas y de uso del suelo hacia procesos más sustentables del aprovechamiento de los recursos naturales. En esta disciplina, es fundamental el conocimiento acerca de las propiedades intrínsecas de los suelos, los factores que controlan su desarrollo y su clasificación taxonómica.

#### **Propiedades intrínsecas de los suelos**

**Perfil edafológico del suelo:** El perfil del suelo consiste de tres (3) horizontes principales -A, B y C- y algunas subdivisiones. Estos horizontes son entendidos a veces como zonas con diferente textura, composición y color. El color puede indicar cómo se ha formado un suelo, el cual indica los diversos materiales que lo componen.

Los distintos horizontes se distinguen generalmente por el tipo de coloraciones. Éstas van aumentando en intensidad desde el blanco hasta el negro, pasando por el pardo. A

medida que se incrementa el porcentaje de humus (materia orgánica parcialmente descompuesta y finamente dividida) su concentración está en relación con la cantidad de vegetación y la actividad enzimática microbiana, factores estos que dependen del clima.

El horizonte A es el suelo superior de la zona de lixiviación, en la cual el agua que percola ha removido arcillas y iones; este suelo es comúnmente rico en materia orgánica. El horizonte B es el subsuelo o zona de acumulación donde las arcillas prevalecen sobre la materia orgánica. El horizonte C marca la transición del perfil del suelo al material parental, no meteorizado, que se encuentra debajo, o roca madre. La figura 4.12, presenta la composición del suelo y edafón.

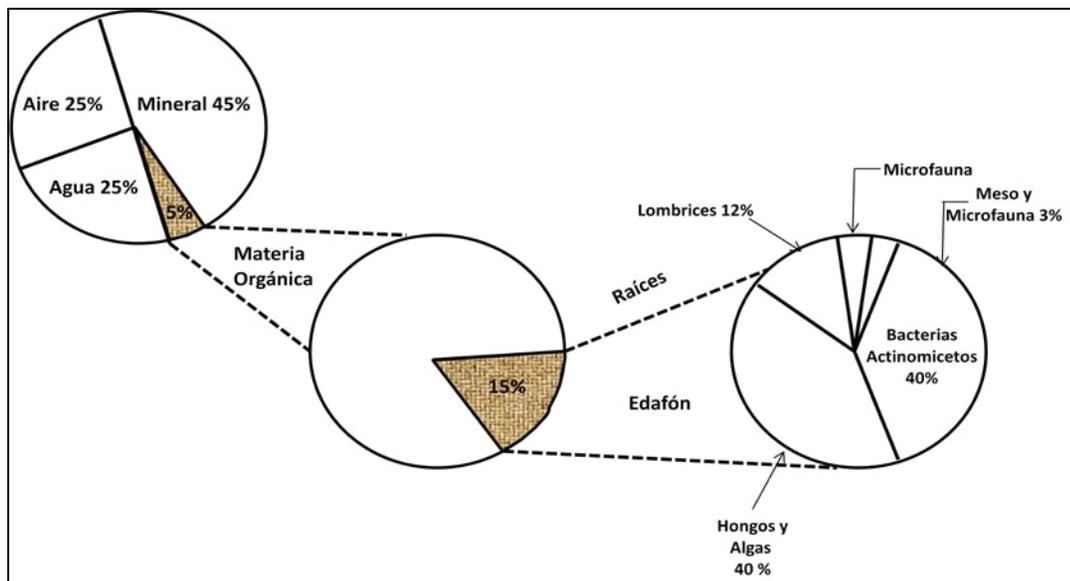


Figura 4.12 Composición del suelo y edafón.  
Fuente: Núñez (2000)

### **Factores que controlan el desarrollo del suelo**

Los factores físicoquímicos y biológicos, más significativos, que controlan el desarrollo del perfil del suelo son:

- ♣ Material parental o roca madre
- ♣ Clima

- ♣ Tiempo de formación
- ♣ Pendiente o topografía
- ♣ Organismos: plantas y animales

En regiones con climas tropicales y rocas muy antiguas, la interacción de estos factores es muy compleja e intensa desde el punto de vista energético.

### Clasificación taxonómica

Esta clasificación, ampliamente utilizada, está basada en: *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys* (1975). Los suelos son clasificados de acuerdo con su estructura y composición en órdenes, subórdenes, grandes grupos, subgrupos, familias y series. Se ha visto que las características del suelo varían enormemente de un lugar a otro; en ella se clasifica el suelo de la siguiente manera:

- ♣ **Entisoles:** suelos débilmente desarrollados sobre material de acarreo en áreas montañosas o serranas. Sus limitaciones son el pobre desarrollo del perfil, la baja fertilidad y, a veces, el alto contenido de sales. Se los encuentra en cualquier tipo de clima y la vegetación va de acuerdo con el mismo, aunque la más característica es la de ribera en los valles aluviales.
- ♣ **Vertisoles:** suelos pesados y arcillosos de clima subhúmedo a árido pero, siempre con un período húmedo que satura el suelo. La vegetación natural es de pastos y hierbas anuales con formaciones xerófilas, adaptadas al período de sequía. Son suelos difíciles de trabajar ya que cuando se humedecen se expanden y en períodos secos se endurecen y agrietan.
- ♣ **Inceptisoles:** suelos húmedos, incipientes, poco evolucionados y con cierta acumulación de materia orgánica. Su textura es uniforme. Son aptos para soportar una sucesión de cultivos con manejo adecuado. Su área de

distribución es muy reducida y se encuentra asociada a climas húmedos. La vegetación suele ser el bosque.

- ♣ **Aridisoles:** suelos de zonas áridas con bajo contenido de materia orgánica y escasa fertilidad. Su textura es gruesa y erosionable, por lo que deben ser manejados muy cuidadosamente para no desencadenar el deterioro por sobrepastoreo. Bajo riego, pueden entrar en producción agrícola pero son vulnerables a la salinización.
- ♣ **Molisoles:** excelentes suelos agrícolas. Tienen una buena estructura granular con alto contenido de materia orgánica y buen drenaje. Las precipitaciones anuales deben ser abundantes para suministrar cierto lavado a través del suelo, aunque las estaciones secas suelen ser normales. Se localizan en una gama climática muy amplia. La vegetación está compuesta por pastos abundantes y bosques.
- ♣ **Alfisoles:** suelos minerales generalmente húmedos de alta saturación básica. Tienen problemas de drenaje debido a su alto contenido arcilloso y poco material orgánico. Pueden ser buenos suelos agrícolas con adecuada fertilización.
- ♣ **Ultisoles:** suelos de baja saturación básica con materiales meteorizables que le dan un color rojo. Poseen materiales arcillosos lavados. Su fertilidad es baja y son pobres en humus. Se los encuentra en climas húmedos, tropicales y templados. La vegetación natural puede ser el bosque, la sabana o flora de pantanos y marismas. Su capacidad agrícola puede acrecentarse con fertilizantes y un buen manejo.
- ♣ **Oxisoles:** suelos rojos por su contenido de óxido, muy lavados de clima subtropical húmedo o templado. Ofrecen una gran fertilidad cuando no han sido explotados. Son muy susceptibles a la erosión hídrica si no están bien manejados. Ofrecen una débil estructura de bosques.
- ♣ **Histosoles:** suelos muy ricos en materia orgánica poco descompuesta. Son típicos de turberas, mallines y algunas terrazas fluviales. Son llamados pantanosos. Carecen de importancia agronómica.

## **Conservación de Suelos**

La protección de recursos naturales permite abordajes desde la preservación (contemplación) y la conservación (manejo condicionado). En la conservación se asume un daño permisible y consecuentemente, se requieren prácticas de recuperación y rehabilitación.

La recuperación y rehabilitación de suelos, se puede definir como un proceso donde se realiza un determinado tratamiento al suelo ocupado por la explotación minera, el cual tiende a minimizar: la degradación de los recursos hídricos, la contaminación del aire y el daño a la fauna acuática y terrestre. De igual forma, con la rehabilitación se puede evitar la erosión, los aluviones y otros efectos adversos que han provocado las antiguas actividades de la explotación minera.

En consecuencia, el objetivo de la rehabilitación consiste en que el suelo, o el terreno en sí, pueda ser recuperado y que sea factible desarrollar diferentes actividades según sean las características del terreno e intereses sociales de las comunidades afectadas.

La conservación de suelos persigue obtener el máximo beneficio sostenido del recurso suelo. Los principales métodos de conservación son los mismos de una buena agricultura: el uso adecuado de la tierra, la labranza, la nutrición de la planta y el manejo del agua. En condiciones de alto riesgo de degradación se requiere prácticas de soporte o prácticas de conservación.

La conservación de suelos es la práctica que persigue restaurar, mejorar y mantener la capacidad productiva de las tierras. Generalmente se relacionan con el control de la degradación del suelo, por lo que se conoce como prácticas de soporte, y que tiene como objetivos:

- ♣ Mantener y mejorar la fertilidad química y física del suelo (nutrientes, materia orgánica, estructura superficial, trabajabilidad, capacidad de almacenamiento de agua, entre otras).
- ♣ Hacer el mejor uso de los recursos tierra, capital y trabajo.

- ♣ Mantener la degradación del suelo en límites tolerables.

#### **4.5.4 Preparación del sustrato**

Según Chacón (1995) la revegetación es la recuperación de áreas degradadas, a través de la plantación de árboles, arbustos u otras plantas, por medios naturales o artificiales. En el caso de áreas afectadas por la minería, el revestimiento vegetal del lugar explotado puede corregir o disminuir, sustancialmente, los impactos provocados a los recursos hídricos, edáficos y visuales del área.

Sin embargo, según López (2000), cuando se ha realizado la actividad extractiva de minerales, al analizar los terrenos donde se quiere llevar a cabo la instauración de la vegetación, se observa dificultad o imposibilidad de desarrollar cualquier tipo de cubierta vegetal por presentar un sustrato inadecuado. En éste las características físicas, químicas y biológicas han sido alteradas, ya que el sustrato puede presentar: escasez de materia orgánica y de nutrientes, bajo contenido de elementos finos, valores de pH extremos, existencia de elementos tóxicos, entre las más significativas.

Dada esta situación, se hace necesario preparar el terreno como paso previo y fundamental en el establecimiento de la vegetación, buscando las soluciones y métodos más adecuados, teniendo en cuenta el tipo de actividad extractiva desarrollada y el uso que se pretenda dar al terreno en la recuperación.

En los trabajos de preparación de terreno hay que tener los siguientes objetivos:

1. Proporcionar un buen drenaje.
2. Descompactar el medio donde se instaura la vegetación para permitir un correcto desarrollo del enraizamiento.
3. Reducir o eliminar la acidez o alcalinidad.
4. Aumentar el suministro de nutrientes para plantas.
5. Integrar la morfología del terreno en el paisaje circundante.

Normalmente la vegetación original encontrada en el área de minería es eliminada al comienzo de las actividades, además de esto, la topografía y el suelo están de tal modo perturbados que cualquier tentativa de restablecimiento de la cobertura vegetal estaría amenazada por las corrientes de agua, formadas y facilitadas por la falta de vegetación original (Chacón, 1995).

Acciones para la recuperación del substrato:

- a. Tratamiento de los taludes del terreno para la vegetación.
- b. Evaluación de opciones de regeneración vegetal de las áreas explotadas.
- c. Selección de tipos de vegetación y de especies más aptas para el revestimiento deseado.
- d. Técnicas de plantación y de manejo del lugar a ser recuperado.

a) Tratamiento de los taludes: las escombreras, terraplenes, vías de acceso y frentes de explotación que presentan taludes superiores a 45° dificultan los trabajos de adecuación del terreno para acoger una determinada vegetación. Estos requieren de un tratamiento especial y son los primeros a ser recuperados para prevenir la erosión, estabilizándolos con vegetación herbácea. Además, éstos merecen especial atención debido al mayor impacto visual provocado por la geometría planar y contrastante con la topografía original, de rasgos más suaves.

Existen tres (3) formas de tratar los taludes:

- Tratamiento con enfajinado.
- Disminución del ángulo de inclinación.
- Realización de sub-banqueo.

b) Regeneración vegetal: sucesiones ecológicas, o naturales, llevadas a cabo en lugares agotados para la actividad minera, con plantas pioneras, o distintas a la asociación original de especies. La rapidez de la recuperación natural dependerá del proceso de intemperización de los suelos, cuyas características están determinadas

por el clima y por la proximidad de las fuentes naturales de semillas, sin influencia del ser humano.

c) Selección de especies vegetales a ser utilizadas: ésta es importante en la medida de su relevancia y de que entren a formar parte de los medios necesarios para alcanzar los objetivos de recuperación del terreno en cuestión.

El propósito de conocer cuál uso, o usos, se requiere desarrollar en una zona ocupada por la explotación minera, resulta básico para desarrollar un esquema de trabajo que permita plantear la selección de especies vegetales, en la cual se deben hacer las siguientes preguntas:

¿Se va a recuperar la zona en cuestión de forma simultánea a la explotación, o por el contrario se va a llevar a cabo una vez finalizada ésta?

¿Se van a plantear remodelaciones de la zona alterada con el fin de adecuarla al nuevo uso?

d) Técnicas de Implantación: la primera medida consiste en estabilizar la superficie del terreno contra la erosión hídrica y eólica. Los métodos básicos son: plantación y siembra.

Plantación: consiste en la técnica para trasplantar especies arbóreas y arbustivas criadas en viveros. Ésta puede ser: manual o mecánica.

Siembra: consiste en depositar, en el terreno previamente preparado, semillas de las especies seleccionadas para revegetar en zonas a recuperar. Ésta puede ser: manual o mecánica.

## **4.6 ASPECTOS SOCIALES**

Una comunidad minera es aquella en la cual su población es significativamente beneficiada y afectada por la operación asociada con la extracción mineral. Esta actividad es la proveedora de empleos directos y cualquier otro tipo de cambio con origen en la minería, además del impacto ambiental y económico. Las comunidades mineras varían sensiblemente en términos de cultura, orientación política, localización geográfica, características ambientales y actitud colectiva acerca del aprovechamiento de los recursos mineros.

Una comunidad minera sostenible es aquella en la cual un beneficio neto puede ser obtenido a partir de la introducción de la operación minera hasta más allá de su cierre. El reto para cualquier operadora minera es comprometerse en un equitativo compañerismo con la comunidad asociada, que deje una herencia de sostenibles y bienestar para la comunidad, evitando la degradación ambiental y la dislocación social (Veiga 2000).

### **4.6.1 Impacto del cierre de mina en las comunidades**

Cuando cierra una mina, el impacto es, por lo general, más dramático que en otros tipos de actividad industrial, debido a que las minas en la mayoría de los casos representan la economía local. En el típico pueblo minero ubicado en zonas remotas, el cierre de la mina generalmente significaba cerrar el pueblo también. Lo remoto de muchas operaciones mineras generalmente implica que hay pocas o ninguna otra oportunidad de empleo (*Mining, Minerals and Sustainable Development, MMSD, Project 2002*).

En el pasado, las dimensiones ambientales del cierre de minas eran las prioritarias. Con el tiempo, los actores se han venido dando cuenta de que las dimensiones social y económica son igualmente importantes.

En sociedades con niveles de empleo y recursos relativamente abundantes, en los últimos años, se han realizado esfuerzos para mitigar estos efectos. En la actualidad, son más frecuentes los programas de reconversión laboral, patrocinados por el gobierno o la operadora minera, representada por: los acuerdos sindicales que estipulan la reconversión laboral, indemnizaciones por despidos y beneficios de reubicación, así como las gestiones destinadas a generar otras fuentes de empleo. Aunque hay ejemplos de antiguas comunidades mineras con éxito en nuevos emprendimientos, como en el turismo, es frecuente encontrarse con antiguas poblaciones mineras en plena depresión o transformadas en ‘pueblos fantasma’, incluso en países con más recursos económicos.

De acuerdo con *MMSD Project* (2002), en sociedades con menos recursos económicos y menor variedad en las fuentes de empleo, el cierre de minas puede ser muy traumático. Cuando el problema afecta a toda una región minera, quizás por la caída en el precio de las materias primas, esto puede tener serias repercusiones políticas.

La planificación del cierre de mina debe incluir un plan para la transición hacia una economía post-minería. En teoría, está claro que este plan debe ser realizado. La planificación y ejecución de cualquier proyecto minero debe apuntar a la creación de beneficios duraderos en diversas escalas:

1. La infraestructura que se utilice debe servir para otras actividades distintas de la minería. Durante la vida útil de la mina debe generarse en la comunidad local la capacidad de mantener dicha infraestructura, junto con una base sólida de recursos económicos que permitan costear el mantenimiento. Aquí se alude no sólo a la infraestructura física (caminos, suministro de agua, electricidad y telecomunicaciones) sino también debe ser incluida la infraestructura social (prestación de servicios de salud, educación y gobierno local).

2. Los niveles de salud, educación, capacitación y calificación laboral de los miembros de la comunidad local deben ser mayores que al inicio de un proyecto.
3. Deben desarrollarse otras fuentes de recursos económicos más allá de la sola minería. Aunque quizás sea imposible equiparar los mejores años de la operación minera, es realista aspirar a una actividad económica progresiva y sustentable a niveles que superen con creces los que existían antes del proyecto. Lo ideal sería una actividad económica diversificada y que ofrezca una amplia gama de oportunidades laborales.
4. La capacidad de la economía local para comprender y manejar las preocupaciones ambientales vinculadas a los residuos de una operación debe estar desarrollada cuando se implemente el plan de cierre de la mina.
5. En el caso de algunas comunidades, la capacidad de seguir realizando sus actividades productivas, en alguna medida, mientras la mina está operando, podría disminuir los impactos negativos del cierre de la operación.

Estos son objetivos alcanzables. Es necesario un conocimiento claro de los roles y responsabilidades de los diversos actores y del proceso adecuado para que exista cooperación entre éstos. La empresa minera tiene una gran responsabilidad en el logro de estos resultados, pero no puede hacerlo por sí sola. Las comunidades deben participar en plenitud en este proceso y organizarse para tal efecto (*Mining, Minerals and Sustainable Development, MMSD, Project 2002*).

La riqueza mineral captada durante la vida útil de la mina debe administrarse de tal modo que genere beneficios de largo plazo para la comunidad. Entre otras cosas, debe utilizarse para generar capacidad en el gobierno y la comunidad local para administrar infraestructura, educación, salud, entre otros sistemas. Un desafío mayor lo constituye la limitada capacidad para este tipo de planificación y seguridad financiera, sobre todo en pequeñas empresas y en el gobierno.

Es posible que las minas actualmente en operación se vean influidas por decisiones tomadas hace décadas. En general, mientras más prolongada ha sido la operación de una mina, más difícil es realizar cambios profundos. En las minas actuales, el tema de los beneficios sostenibles, por lo general, se transforma en tema principal sólo cuando se acerca el momento de cierre. El mayor grado de flexibilidad se da con las nuevas minas, las que pueden explorar en plenitud todas las opciones con las mínimas limitaciones, aun cuando la planificación global del cierre de mina no siempre esté presente en la etapa previa a la explotación de muchas minas nuevas y en proyecto. Las políticas de gobierno, cuando las hay generalmente, se limitan a los aspectos ambientales físicos del cierre de mina.

Una estrategia de cierre de mina debe ser parte integral de la planificación del desarrollo y la operación de la misma. Ésta debe ser revisada a lo largo de la vida útil de la mina para reflejar los cambios en las expectativas de la comunidad, en las actividades económicas y en la mayor capacidad productiva, así como en nuevas responsabilidades de ciertos actores, entre otros cambios.

La planificación de cierre será especialmente compleja al inicio de la operación de la mina; es necesario tener una mínima consideración para garantizar la sustentabilidad a largo plazo de los mecanismos, instituciones y procesos creados para distribuir los beneficios socioeconómicos. Por ejemplo, es necesario considerar alternativas económicas desde el comienzo, así como se hace con las responsabilidades y resultados del proceso. Los siguientes elementos son fundamentales para cualquier estrategia:

- Liderazgo y compromiso de parte de todos los actores.
- Capacitación de los actores.
- Identificación y creación de actividades económicas para las comunidades en la etapa posterior a la mina, que incluyen actividades previas y las que se relacionan con

la actividad minera, como también actividades no vinculadas con la minería, como el turismo y los servicios agrícolas.

#### 4.6.2 Participación de la comunidad en la toma de decisiones

Históricamente, se han formulado las políticas de desarrollo minero sin consultar a las comunidades. Sin embargo, están empezando a aparecer algunos ejemplos de participación efectiva de la comunidad, como la amplia consulta incluida en la redacción de la reciente política minera de Sudáfrica. Tradicionalmente, en el ámbito local la consulta pública se ha limitado a comunicar ciertos aspectos de los proyectos a las comunidades afectadas o a tratar las quejas de la comunidad.

Anteriormente, la relación entre la industria minera y las comunidades era comúnmente limitada a la apertura y fase operacional de la mina (ver figura 4.13). A medida que la mina se encamina hacia el cierre, la comunicación entre empresa y comunidad ha sido en un solo sentido. La compañía informa a la comunidad que la mina está cerrando (frecuentemente sin llamar mucho la atención) y la comunidad es dejada luchando para “recoger los restos”. A diferencia de cuando la mina fue inicialmente permitida, durante el cierre no existen mecanismos formales que reúnan a la compañía y a las comunidades a negociar un equitativo arreglo de cierre. Sin un método más sistemático para enfrentar los costos sociales del cierre, las decisiones del uso de la tierra después de la minería, usualmente, no ayudan a la comunidad en la transición que vive después del cierre.



Figura 4.13 Enfoque tradicional de la consulta a la comunidad.  
Fuente: Proyecto de base de datos, cierre de minas y recuperación (et al., 2001)

Sin embargo, algunos investigadores sugieren que un nuevo tipo de consulta a la comunidad debe ser considerada (ver figura 4.14). En este enfoque, ambas partes son consideradas mucho más activas en el desarrollo de estrategias de cierre que balanceen las legítimas preocupaciones de ambas partes.

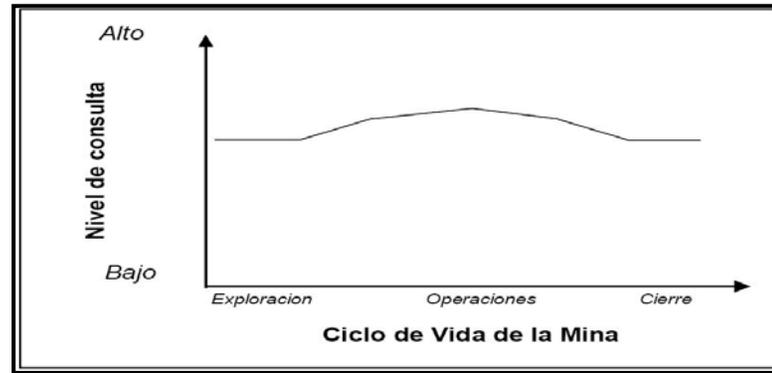


Figura 4.14. Enfoque proactivo de consulta a la comunidad.

Fuente: Fuente: Proyecto de base de datos, cierre de minas y recuperación (et al., 2001)

En fechas recientes, la regulación viene utilizando la integración de la opinión pública como un proceso formal en la evaluación del impacto social (EIS) y en la identificación de las preocupaciones públicas.

Más específicamente, un EIS es visto como una herramienta por quienes toman decisiones que pueden ser usadas para solucionar, más efectivamente, algunas cuestiones como:

- La forma de crear alianzas entre la industria, el gobierno y las comunidades involucradas, con el propósito de facilitar una distribución más equitativa de los beneficios y costos de la explotación.
- La formulación de estrategias de desarrollo que van a promover a largo plazo el bienestar socioeconómico y la sustentabilidad ecológica de una comunidad.

No es posible presentar soluciones genéricas porque cada individuo y cada comunidad es única y las soluciones deben ser pensadas considerando las particularidades de cada proceso de cierre de mina (Roberts y Veiga, 2000; en Castillo, 2005).

La experiencia en la práctica ha demostrado a las empresas que un buen proceso de consulta en el ámbito local genera beneficios significativos. Quizás, lo más importante para un proyecto minero es el hecho de que el proceso sirve para fomentar relaciones auténticas de respeto mutuo, con preocupaciones y objetivos compartidos entre la comunidad, la empresa y otros actores.

La toma de decisiones debe reconocer los derechos de las comunidades a tener representación y participación en los procesos que les afectan, debiendo basar su interacción entre el proyecto minero y la comunidad en los valores, objetivos y aspiraciones de la comunidad afectada.

En la empresa minera debe existir disposición a sostener un diálogo auténtico con la comunidad; caracterizándose la entidad jurídica por la transparencia en sus comunicaciones, desde el inicio y durante toda la vida útil de la mina. En ésta se debe escuchar y responder adecuadamente a los temas planteados por la comunidad. Las comunidades deben recibir información actualizada con cierta regularidad, o cada vez que se produzcan cambios, como la expansión o reducción de las actividades mineras. El proceso de comunicación debe ser de tal modo que no intimide a las personas de la comunidad local (el uso excesivo de lenguaje técnico, por ejemplo, puede generar de inmediato una barrera a la comunicación).

Es posible que la comunidad necesite ayuda para generar la capacidad requerida para tener una plena participación en la toma de decisiones. Los programas y los fondos que apoyan a la capacitación deben ser planificados y controlados, en conjunto con líderes locales, en los casos que sea posible; el control local de los recursos financieros estimula a las organizaciones a generar capacidades administrativas y de gestión. Con el fin de incentivar la participación, que puede demandar mucho tiempo a cada miembro de la comunidad, las personas deben saber que están adquiriendo habilidades que pueden integrarse en la economía una vez que culmine el proyecto.

Actualmente, uno de los principales tópicos en discusión es hasta qué punto la consulta implica cierto grado en la toma de decisiones compartida. Aunque las empresas mineras reconocen cada vez más que las comunidades y las organizaciones no gubernamentales (ONG) deberían participar en la definición de las medidas de mitigación o en los proyectos de desarrollo social, la toma de decisiones compartida en temas claves de gestión no es fácilmente aceptada.

Avanzar hacia la participación, más que hacia la consulta, significa en definitiva que las comunidades locales participen directamente en la toma de decisiones, por ejemplo, a través de una representación en el directorio. Esto puede que no sea una posibilidad inmediata, pero debería considerarse como un objetivo a largo plazo.

Según Canter (1997), las actividades en las cuales intervienen los ciudadanos organizados se conocen como participación ciudadana, participación pública, compromiso público y compromiso ciudadano. El principal propósito de incluir programas o actividades de participación pública en el proceso de decisiones es aprovechar las aportaciones de agencias gubernamentales, ciudadanos y grupos públicos de interés, para mejorar la calidad de la misma. Entre los grupos de interés se encuentran aquellos que representan a la industria, a la promoción, a la conservación y a la protección. La participación pública puede definirse como un proceso bidireccional y continuo de comunicación que implica:

- 1) Facilitar a los ciudadanos la comprensión de los procesos y mecanismos a través de los cuales la agencia responsable investiga y resuelve los problemas y necesidades ambientales.

- 2) Mantener al público completamente informado sobre el estado y progresos de los estudios y de las implicaciones de las actividades de evaluación y formulación del proyecto, programa o política.

3) Solicitar a los ciudadanos afectados que expresen de forma activa sus opiniones y percepciones acerca de los objetivos y necesidades, acerca de sus preferencias en la utilización de recursos, acerca de diferentes estrategias de desarrollo o gestión alternativas y sobre cualquier otra información y ayuda relativa a la decisión.

#### **4.6.3 Prácticas para reducir los impactos de cierre**

Cuando se desarrollan políticas para disminuir los impactos sociales del cierre de mina, es importante recordar que no se debe pensar en términos de respuestas genéricas. Teniendo en cuenta que cada individuo y su comunidad son el producto de su propia y particular historia, las soluciones deben ser diseñadas a la medida de cada situación de cierre. Esas soluciones deben ser puestas en marcha después de un cuidadoso análisis de la capacidad socioeconómica de la comunidad para llevarla a cabo.

Una práctica que debe ser planificada e implementada es la rehabilitación laboral de comunidades. Esta rehabilitación consiste en un proceso de desarrollo de capacidades del personal, que cesa en sus labores ordinarias de minería, con el fin de facilitar su reinserción en el mercado de trabajo dependiente o en el inicio de actividades laborales independientes, optimizando los recursos personales y materiales con los cuales cuenta al momento del cese.

Finalmente, si las soluciones son exitosas en lograr un ecuánime establecimiento para manejar el decrecimiento y cierre de la mina, éstas deben contar con el respaldo del gobierno, la comunidad y la operadora minera.

## ***CAPÍTULO V. METODOLOGÍA ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.***

La realización de esta investigación se desarrolló en tres (3) etapas, iniciando a finales de 2005 y concluyendo a mediados de 2007. La primera etapa, de ahora en adelante, etapa preliminar de oficina y campo, consistió en: recopilar información técnica básica sobre cierre de mina y metodologías para planes de cierre; levantar información de aspectos descriptivos, físicos del CFSI y operativos de la CVG-FMO; observar directamente los cerros; y determinar la secuencia de agotamiento de los mismos. Además, fue aplicada una encuesta a miembros de la comunidad de Ciudad Piar, con el objeto de indagar sus opiniones sobre el proceso de planificación de cierre.

En la segunda etapa, campo propiamente dicho, entre agosto y octubre de 2006, se realizaron nuevamente inspecciones a los cerros del CFSI, con el objetivo de evaluar, visualmente, las condiciones de los taludes y los procesos de erosión – sedimentación de suelos, de realizar la selección de sitios de muestreo, la recuperación y ensayo de muestras de suelos, con fines de caracterización física. Además, se realizó la modelización de los cambios topográficos en la oficina de Ciudad Piar.

Finalmente, en la tercera etapa, procesamiento de información, la cual fue realizada en Caracas, se realizó la visualización e interpretación de los cambios topográficos y el análisis de la información obtenida para proponer un plan de cierre de mina.

### **5.1 ETAPA 1. PRELIMINAR DE OFICINA Y CAMPO**

#### **5.1.1 Metodología para planificación del cierre de mina en el CFSI**

La revisión de la literatura técnica actualizada, la cual recoge experiencias formales para planificar cierres de mina, en países como Chile y Perú, referidos en el capítulo

IV, permitió elaborar una metodología que resume las acciones que deberían ser llevadas a cabo al planificar el cierre del CFSI y que puede ser aplicado por CVG-FMO, en un futuro cercano. La metodología elaborada se presenta en el flujograma de la figura 5.1 y es la siguiente:

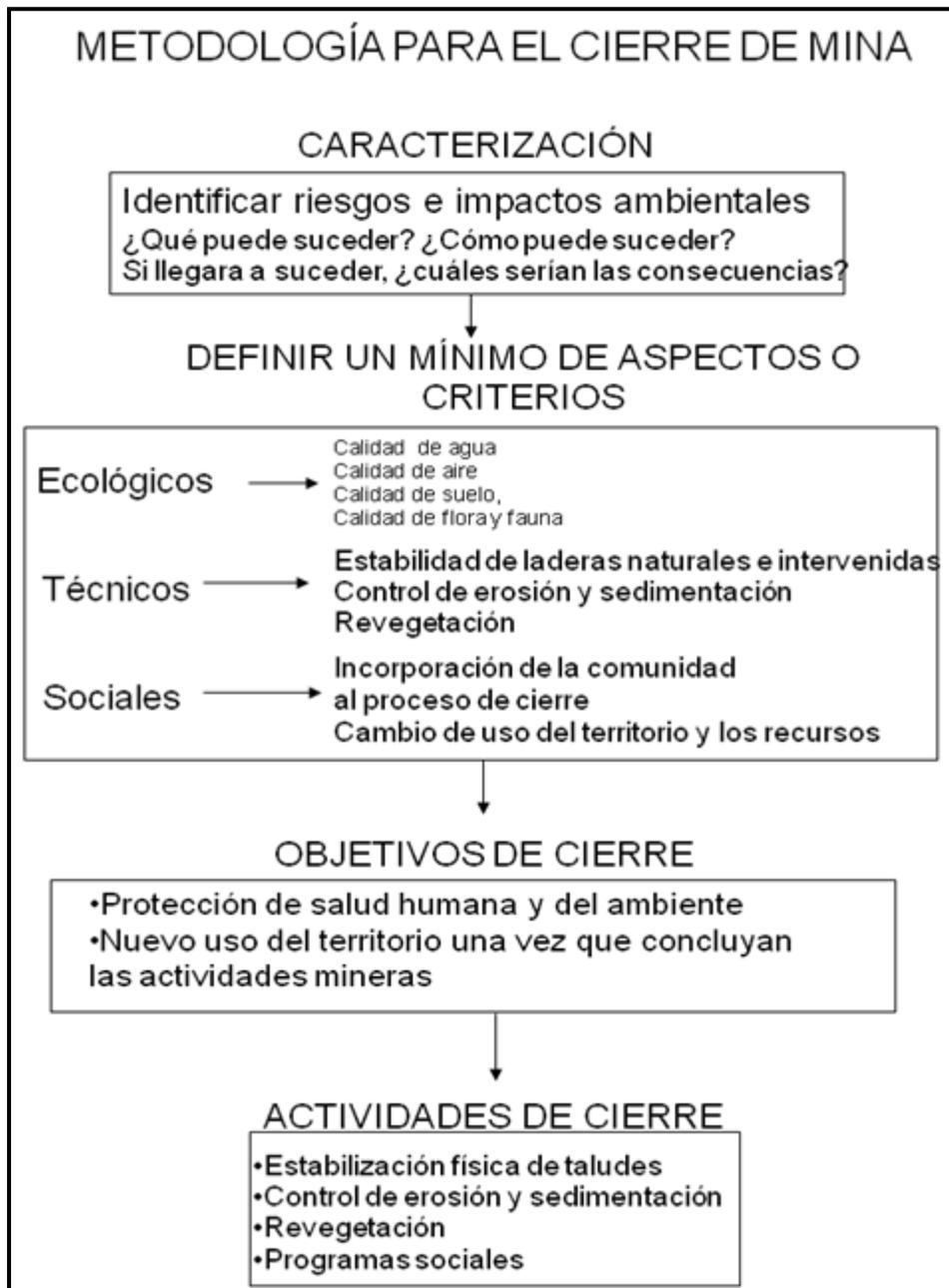


Figura 5.1 Metodología para cierre de mina.

### 5.1.2 Determinación del agotamiento en minas del CFSI

La revisión de los planes de explotación, a corto, mediano y largo plazo del CFSI, permitió establecer que el plan de cierre de mina debe ser propuesto debido al inexorable agotamiento del recurso mineral ferrífero minable.

Para determinar el orden o la secuencia en que se agotarán los cerros del CFSI, se realizó el ejercicio de sustracción para estimar, por diferencia entre las reservas recuperables (alto tenor + finos para concentrar) y la producción aportada por mina, la reducción de las reservas minables, llevando por consiguiente al agotamiento de los yacimientos minerales.

Para realizar este ejercicio se tomaron en cuenta, las características operativas actuales de CVG-FMO:

- ♣ Los datos han sido levantados y procesados a partir de 2005.
- ♣ Con excepción de San Joaquín, los cerros del CFSI no aportan el mismo porcentaje a la producción, es decir, no producen la misma cantidad de mineral: San Isidro aporta alrededor del 26,84%; Los Barrancos el 69,15%; y Las Pailas el 4 %.
- ♣ En el año 2011 comenzará la explotación del cerro San Joaquín.
- ♣ A partir del 2008 comenzará el proyecto de la planta de concentración de cuarcita friable.

Los datos procesados son mostrados en la tabla 5.1, destacando, en números con negritas, los años de agotamiento de las minas en el yacimiento.

El orden de agotamiento de las minas del CFSI resultó en los años siguientes: Las Pailas en 2023, San Isidro en 2031, Los Barrancos en 2041 y San Joaquín en 2045.

Tabla 5.1 Agotamiento del CFSI.

Año	Producción en Mt				Producción total CFSI en Mt
	San Isidro	Los Barrancos	Las Pailas	San Joaquín	
2005	5.395	13.900	805		20.100
2006	6.836	13.941	1.759		22.536
2007	7.756	15.610	1.812		25.178
2008	7.834	15.004	2.098		24.936
2009	6.639	13.233	1.378		21.250
2010	8.500	14.160	2.340		25.000
2011	8.500	12.660	2.340	1.500	25.000
2012	8.500	12.160	2.340	2.000	25.000
2013	8.500	11.160	2.340	3.000	25.000
2014	8.500	10.500	2.340	3.660	25.000
2015	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2016	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2017	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2018	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2019	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2020	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2021	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2022	8.500	10.500	3.000	3.660	25.660
2023	8.500	10.500	<b>3.000</b>	3.660	25.660
2024	3.000	12.000		4.500	19.500
2025	3.000	12.000		4.500	19.500
2026	3.000	12.000		4.500	19.500
2027	3.000	12.000		4.500	19.500
2028	3.000	12.000		4.500	19.500
2029	3.000	12.000		4.500	19.500
2030	3.000	12.000		4.500	19.500
2031	<b>3.000</b>	12.000		4.500	19.500
2032		15.000		4.500	19.500
2033		15.000		3.000	18.000
2034		15.000		3.000	18.000
2035		15.000		3.000	18.000
2036		15.000		3.000	18.000
2037		15.000		3.000	18.000
2038		15.000		3.000	18.000
2039		15.000		3.000	18.000
2040		15.000		3.000	18.000
2041		<b>15.000</b>		3.000	18.000
2042				3.000	3.000
2043				3.000	3.000
2044				3.000	3.000
2045				<b>3.000</b>	3.000
<b>TOTAL (alto tenor + FPC)</b>	<b>177.460</b>	<b>472.828</b>	<b>46.552</b>	<b>122.600</b>	<b>819.440</b>

Esta secuencia permite establecer el tipo de estrategias y acciones que se deben tomar para el cierre de los cerros en producción actualmente. Mientras que para estos cerros las estrategias a poner en práctica son de recuperación, en la conservación ambiental,

no obstante, en la planificación de explotación de San Joaquín es posible adoptar estrategias de prevención, a partir de la experiencia de explotación de los otros cerros, siendo que éste no está afectado por la actividad minera.

Por otra parte, con los datos proyectados anteriormente y los históricos de producción se estimó la vida útil de las minas. Los resultados se presentan en la tabla 5.2

*Tabla 5.2 Estimación de la vida útil de las minas del CFSI.*

<b>Mina</b>	<b>Año de inicio de operaciones</b>	<b>Año de cierre (estimado)</b>	<b>Vida útil (en años)</b>
<b>San Isidro</b>	1968	2031	63
<b>Los Barrancos</b>	1990	2041	51
<b>Las Pailas</b>	1992	2023	31
<b>San Joaquín</b>	2011	2045	34

Adicionalmente, se graficaron los datos históricos y proyectados de producción (ver figura 5.2).

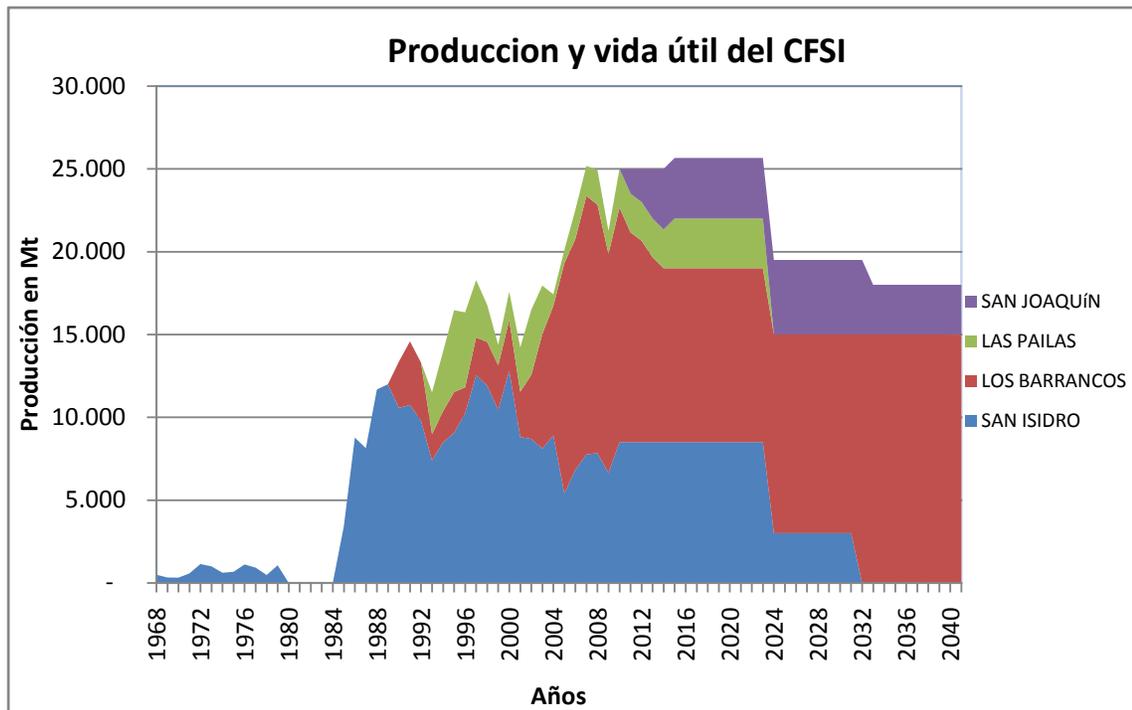


Figura 5.2 Producción y vida útil del CFSI.

Del gráfico se puede apreciar que el mayor aporte a la producción lo realiza el cerro Los Barrancos, seguido de San Isidro, luego San Joaquín y finalmente Las Pailas.

### 5.1.3 Encuesta a miembros de la comunidad

La interacción con los miembros de la comunidad de Ciudad Piar (en esta investigación la comunidad está representada por trabajadores de CVG-FMO y residentes de Ciudad Piar) permitió estar al tanto que el tema de cierre de mina es muy poco conocido, abordado y en algunos casos, es evadido, temido, o no tomado en cuenta.

Para conocer la opinión de la comunidad se aplicó una encuesta a 12 personas, de las cuales ocho (8) eran trabajadores de diversos departamentos de CVG-FMO y cuatro (4) residentes. El modelo de encuesta se presenta a continuación y los resultados de su aplicación se muestran en la tabla 5.3.

#### Encuesta aplicada a la comunidad en el CFSI

1. ¿Cree usted que es importante propiciar la participación pública efectiva y temprana en el planteamiento de proyectos en Ciudad Piar?

Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ NR \_\_\_\_\_ NS \_\_\_\_\_

2. ¿Cree usted que la comunidad debe tener acceso a la información asociada con proyectos futuros de la localidad?

Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ NR \_\_\_\_\_ NS \_\_\_\_\_

3. ¿Cómo le gustaría que fuese Ciudad Piar dentro de 50 años?

Próspera \_\_\_\_\_ NR \_\_\_\_\_ NS \_\_\_\_\_

Productiva \_\_\_\_\_

Deprimida \_\_\_\_\_

Igual que en la actualidad \_\_\_\_\_

4. ¿Sabe usted que es un plan de cierre de mina?

Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ NR \_\_\_\_\_ NS \_\_\_\_\_

5. ¿Cuál uso le gustaría que tuviese el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro (CFSI), después que se agoten las reservas de mineral de hierro?

Agropecuario \_\_\_\_\_

Área residencial o urbana \_\_\_\_\_

Parques y áreas de recreación \_\_\_\_\_

Áreas para conservación de la fauna y refugio ecológico \_\_\_\_\_

Áreas para la obtención de recursos hídricos \_\_\_\_\_

Depósito de estériles y basura \_\_\_\_\_

NR \_\_\_\_\_ NS \_\_\_\_\_

NR: no responde; NS: no sabe

Los resultados de las encuestas aplicadas son los siguientes:

*Tabla 5.3 Resultados de la encuesta aplicada a la comunidad en el CFSI.*

N° Pregunta		Respuestas (en %)				
1	Sí	No	NR	NS		
	85	10	0	5		
2	Sí	No	NR	NS		
	95	0	0	5		
3	Próspera	Deprimida	Igual que en la actualidad			
	90	0	10			
4	Sí	No	NR			
	30	60	10			
5	Agropecuario	Residencial	Parques y áreas de recreación	Conservación de fauna y refugio ecológico	Obtención de recursos hídricos	Depósitos de estériles y basura
	0	20	60	10	5	5

Con la finalidad de identificar las tendencias acerca del novedoso tema de cierre de mina, los resultados de la encuesta aportan valores indicativos en el proceso de proponer un plan de cierre. Por ejemplo, al consultar el uso que le gustaría que tuviese el CFSI, después que se agoten las reservas de mineral de hierro, el 60% respondió “parques y recreación”, 20% “residencial” y 10% “conservación de fauna y refugio ecológico”. Por otra parte, cuando se consultó en la pregunta: ¿Sabe usted que es un plan de cierre de mina?, el 60% de los encuestados respondió “No” y otro 10% “No respondió”.

En Ciudad Piar el problema radica en que los empleos ofrecidos por CVG-FMO han pasado de generación en generación, en donde la escasa diversidad económica limita a la comunidad y el estilo de vida es algo especial, la población es de edad media y avanzada, la mayoría tienen sus raíces allí, por lo tanto están muy arraigadas a la zona y para ellos se torna muy difícil concebir el futuro sin la minería. Aun más, la relación de CVG-FMO con la comunidad es de tal dependencia que, la operadora minera ha asumido, por años, las funciones de servicios básicos que corresponden, en otras poblaciones, a las autoridades locales.

También, en entrevistas personales realizadas a pobladores, con el fin de promover el conocimiento sobre el proceso del cierre de mina, se conoció sobre la experiencia negativa como consecuencia del agotamiento del cerro El Pao. Esta otra mina, la cual fue operada por CVG-FMO, desde el año 1928 y cesó sus actividades en el año 1997, en la cota 350 msnm, generó el deterioro de la calidad de vida de los ciudadanos, al no tener previstos planes de cierre que incluyeran la rehabilitación laboral de las comunidades. Los pobladores entrevistados manifestaron su deseo e interés de que esa experiencia no se repita en Ciudad Piar.

## 5.2 ETAPA 2. CAMPO

La información obtenida en la fase anterior y las visitas de campo realizadas a cada uno de los cerros del CFSI permitió conocer las operaciones básicas de minería, el entorno físico natural, descritos en los capítulos II y III de esta investigación.

En esta etapa se observaron de manera directa (inspección visual) taludes y suelos, para evaluar criterios e indicadores, con fines de control de erosión. Las apreciaciones se describen a continuación:

### 5.2.1 Observación directa (inspección visual)

#### Con relación a la estabilidad de los taludes

Mediante la inspección visual de los cerros, se pudo apreciar que, en general, la planificación minera de corto plazo aplica el diseño geométrico previsto. Desafortunadamente, en la ladera sur de San Isidro se ejecuta un diseño geométrico que genera doble banqueo y sobreexcavación en la base de los taludes. Esto aumenta la altura del talud y consecuentemente la inclinación, por lo cual aumenta el riesgo a la inestabilidad y a la erodabilidad de la masa rocosa, particularmente los finos negros (ver figuras 5.3 y 5.4).



Figura 5.3 Frente de trabajo en cerro SI.



Figura 5.4 Frente de trabajo en cerro LB.

La figura 5.5 muestra la vista de un frente de trabajo en explotación, del cerro San Isidro, en el nivel 640, se evidencian movimientos gravitacionales de material blando (finos negros) que se acumulan en la base del talud, comprometiendo la operatividad, de manera segura. Esta mena puede ser manejada con uso de cargadores frontales y camiones. Los materiales son expuestos al proceso de erosión-sedimentación, hacia el fondo de la fosa en progreso, como se comenta en otra sección.



Figura 5.5 Frente de trabajo en cerro San Isidro.

En todos estos casos (ladera sur de San Isidro), es posible inferir que el ángulo de fricción interno de estos materiales haya sido superado ampliamente por el ángulo de talud de trabajo, el cual corresponde a  $75^\circ$ , para cualquier litología (finos y costras), de acuerdo con el diseño geométrico, produciéndose el movimiento descendente de los materiales. Puede ser necesario implementar diseños geométricos en función de las distintas litologías que van quedando expuestas en el yacimiento, para facilitar las labores operativas y mejorar las condiciones para la gestión geoambiental.

Lo anterior se hace más evidente en los frentes de explotación de la mina Las Pailas donde se observa la verticalidad de los taludes en una zona de afloramiento de costras (ver figura 5.6). Pero, también se observa en estos mismos taludes la ocurrencia de familias de diaclasas y planos de debilidad. Sin embargo, pareciera que aun en las costras (litologías más duras) un diseño geométrico con taludes verticales resulta inapropiado, ya que podría comprometer la estabilidad de dichos taludes y por ende afectar la operatividad de las operaciones y la seguridad de los operadores.



Figura 5.6 Vista de frente de trabajo en cerro Las Pailas.

En la figura 5.7 se observa la presencia de cárcavas con deslizamientos de material en el talud de este depósito de MPNC, pudiendo ocasionar la falla en el mismo, por una rotura circular.



Figura 5.7 Vista depósito de MPNC en SI

### **Con relación a la erosión de suelos**

La inspección visual de los suelos del CFSI permitió apreciar que estos están sometidos a intensos procesos de erosión y sedimentación, potenciados por las fuertes pendientes, la eliminación de la cobertura vegetal y las precipitaciones.

En el caso de mina San Isidro (SI), se observan cantidades significativas de finos negros en la ladera sur, descendiendo con un mecanismo tipo deslave de suelos, por la combinación de los factores: la litología granular exclusivamente friccionante, la elevada pendiente, el salpique y arrastre por el agua, además de las vibraciones de las voladuras. Esto genera un proceso intenso de erosión, desde laminar, en surcos y hasta cárcavas, como muestra la figura 5.8. En SI, aunque esta litología presenta un alto grado de fricción interna ( $38^\circ$ ), no obstante la pendiente, la cual varía entre 45, 50 y 60%, potencia el proceso de erosión.



Figura 5.8 Vista de ladera sur de la Mina San Isidro

Obviamente, el problema sigue siendo más operativo minero, que ambiental, toda vez que estos finos no son transportados en dirección a algún curso natural de agua, por lo que la sedimentación ocurre en el fondo de la fosa minera. En definitiva, al aumentar la pendiente, se incrementa la velocidad de flujo de la pulpa de finos negros producida, aumentando su poder de separación de partículas y generando un mecanismo tipo flujo en medio denso.

En SI, las aguas son bombeadas hacia el exterior de la fosa para el dragado de los finos negros acumulados, la mena ferrífera. Estas aguas drenan al ambiente natural, en dirección al oeste, menos accesible que en mina Los Barrancos (LB), donde las aguas drenan directamente a la quebrada Arasiama (como se explicará más adelante).

En general, se ejecuta el manejo de las aguas de mina mediante un sistema de drenaje, el cual es actualizado mensualmente y está incluido en la planificación minera a corto plazo. Este sistema está constituido por cunetas longitudinales en pie de talud y bermas con bombeo en dirección al talud. Estas cunetas conducen las aguas de un

extremo al otro de los frentes de arranque, paralelos a los taludes, descendiendo hasta el fondo de la fosa minera. Sin embargo, en algunas bermas este manejo no se cumple efectivamente y se generan surcos en los suelos de SI, como muestra la figura 5.9.



Figura 5.9 Vista del proceso de erosión en surco en SI.

También se evidencian los efectos erosivos en el propio control del drenaje; éste es el caso de una cárcava incipiente en mina Las Pailas (LP). De allí que si la conducción de las aguas está produciendo los surcos y cárcavas referidas, probablemente la pendiente de drenaje en la berma sea muy alta con relación a la litología llamada costras ferríferas. Surge la interrogante acerca del comportamiento de estas “costras” con relación al paso del agua drenada, en vista de la pérdida significativa de suelos. Diera la impresión de que las “costras” deberían responder mejor al proceso de erosión inducido por el drenaje de suelos. Este sistema de drenaje requiere ser actualizado en su evaluación y en las acciones correctivas que fuesen necesarias, para evitar que los surcos profundicen en cárcavas como las mostradas en la figura 5.10.



Figura 5.10 Vista del proceso de formación de una cárcava en SI.

En un talud que se encuentra en la entrada del CFSI también se evidencia la existencia de cárcavas anchas con el añadido de material de desecho de la vía férrea, a modo de relleno, dentro de la misma (ver figura 5.11).

Aparentemente, se intentó controlar el crecimiento de la estructura de erosión con materia prima no conforme (MPNC) y la colocación de una estructura en forma de muro o barrera de retención. Esta medida, por lo visto, no fue suficiente y por el contrario el arrastre continuó, en el tiempo. Por el peso se produjo el colapso de la estructura y el arrastre de los materiales de relleno y la formación del abanico en la vía de acceso al CFSI. Esta situación demuestra la intención de atender el proceso de erosión pero, demanda una práctica más adecuada en la gestión ambiental.



Figura 5.11 Vista de una cárcava en SI.

Otro aspecto resaltante es que, en ausencia de la capa superior del suelo, no es posible el desarrollo de la regeneración vegetal natural en las zonas explotadas. El piso operativo, o base de explotación, pasa a ser la nueva superficie del suelo, una vez finalizada la fase de producción mineral, siendo pues una costra donde con mucha dificultad y lentitud se podría ir conformando un sustrato capaz de sustentar y propiciar el desarrollo de una nueva cobertura vegetal, que proteja contra el arrastre de sedimentos y que mejore sustancialmente el aspecto paisajístico del sitio.

En mina Los Barrancos (LB) los suelos también se ven afectados significativamente por procesos erosivos; la ladera sur se encuentra perturbada por el transporte de sedimentos finos provenientes de los frentes de arranque y de otros lugares de la mina. Éstos son transportados ladera abajo por las aguas de escorrentía y descargados en el lecho de la quebrada Arasiama. En las figuras 5.12 y 5.13 se presentan dos vistas, proximal y distal, en dos secciones distintas de esta quebrada. La vista a distancia fue tomada desde la ladera sur de LB.

El cauce de la quebrada Arasiama se encuentra desviado por acción de los sedimentos acumulados; se encontraron secciones parcialmente colmatadas, durante la etapa de campo. Se observa la coloración rojiza que tienen las aguas, producto de la acumulación de fracciones finas, sedimentables y suspendidas.



Figura 5.12 Acumulación de sedimentos en el lecho de la quebrada Arasiama.



Figura 5.13 Vista de la quebrada Arasiama desde la ladera sur de LB.

Indudablemente que por su ubicación al pie del cerro, la quebrada es susceptible de recibir gran cantidad de sedimentos finos que provienen de los frentes de explotación

y de otros lugares de la mina. Esta situación podría ser mejorada con un manejo más efectivo del sistema de drenaje de mina, lo cual permita descargar los sólidos en áreas planificadas y preparadas para sedimentación, como diques y lagunas.

De hecho, la operadora atiende el problema de colmatación de la quebrada con el dique construido en la parte media de la ladera sur de LB, como parte del sistema de control de sedimentos finos en la quebrada Arasiama. La figura 5.14 muestra una vista longitudinal, aguas arriba del dique. Se observan tres (3) zonas, con colores amarillo, naranja y marrón, las cuales pueden contener materiales tipo coloidales, arcillas, limos y arenas, respectivamente.



Figura 5.14 Vista de dique en la ladera sur de LB

Cuando la precipitación es muy intensa, se acumula mayor cantidad de agua; rebosando, desbordando y descargando los materiales finos acumulados en el lecho de la quebrada, aguas abajo del dique, resultando insuficiente la medida de protección. Esto quiere decir que el dique cumple parcialmente su función pero, como fue descrito anteriormente, el diseño parece limitado.

Los procesos erosivos en la ladera sur de LB son evidentes y se ven incrementados por factores como la pendiente, que alcanza 60%. Las figuras 5.15 y 5.16 presentan vistas de la pendiente de la vertiente sur de LB. Estas zonas desprovistas de vegetación natural actúan como una especie de rampa inclinada por donde deslizan todos los materiales que provienen de la mina y que sedimentan en el cauce natural.



Figura 5.15 Vista de la ladera sur de LB



Figura 5.16 Vista de la ladera sur de LB

## 5.2.2 Caracterización física de suelos

### Muestreo

Se realizó un muestreo de suelos en 12 sitios de los cerros operativos del CFSI: tres (3) en San Isidro (SI), siete (7) en Los Barrancos (LB) y dos (2) en Las Pailas (LP).

Los sitios de muestreo fueron divididos por zonas:

En SI se muestreó en la parte sur del yacimiento; las muestras (M) fueron:

- 01-001-SI, 01-002-SI y 02-001-SI.

La figura 5.17 muestra el momento cuando se tomaban las muestra.

En LB, se tienen tres (3) zonas a lo largo de la ladera sur de la mina, lugar hacia donde drenan las aguas de escorrentía y que van directo a la quebrada Arasiama:

- zona 1, al este: muestras 01-001-LB, 01-002-LB y 01-003-LB

- zona 2, en el centro: muestras 02-001-LB y 02-002-LB
- zona 3, al oeste, frente a PTLB: muestras 03-001-LB y 03-002-LB.

La figura 5.18 presenta uno de los sitios donde se realizó el muestreo.

En LP se realizó en la vertiente norte de la mina en una zona y las muestras fueron:

- 01-001-LP y 01-002-LP.

La ubicación y distribución se presenta en el mapa titulado: “sitios de muestreo de suelos”, en el plano n° 1, de este documento.



Figura 5.17 Tomando muestras en Cerro San Isidro (SI).



Figura 5.18 Uno de los sitios de muestreo en Los Barrancos (LB).

### Ensayos de laboratorio

Se realizaron ensayos de laboratorio, según la norma de clasificación de suelos de la ASTM (por sus siglas en inglés, *American Society for Testing and Materials*) con el fin de caracterizar físicamente los materiales muestreados. En esta investigación, los ensayos fueron seleccionados considerando al control de sedimentos en minería a cielo abierto como el de mayor necesidad e importancia para la gestión ambiental.

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

#### **Tamizado, en seco**

El ensayo granulométrico por vía seca se realizó con la serie de tamices, según norma ASTM E-11, números: 3 / 4", 3 / 8", N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 100 y N° 200. De acuerdo con la Tabla II-4 de la Clasificación Unificada de Suelos (CUS) (Ugas, 1985) la división entre los materiales granulares, con tamaños de gravas y arenas, es establecida en el análisis del 50% de la fracción del tamiz N° 4.

Los resultados para cada una de las minas se presentan a continuación:

- ♣ Muestras de la mina San Isidro (SI)

Los resultados para todas las zonas, se muestran en la tabla 5.4 y en la figura 5.19 las curvas de distribución granulométrica.

*Tabla 5.4 Resultados de clasificación de suelos. Muestras SI. Tamizado seco.*

Muestras	Tipo de Suelo				Resultado tipo de suelo, CUS
	Suelo grueso en %			Suelo fino en %	
	Gravas	Arenas			
		gruesa	finas		
01-001-SI	35,902	32,421	28,190	3,487	Arena con grava, SP
01-002-SI	9,886	32,212	49,213	8,689	Arena con grava, pocos finos, SP-SM
02-001-SI	38,621	31,227	23,986	6,166	Arena con grava, pocos finos, SP-SM

Las muestras tienen una distribución de tamaños de gruesos, entre 54% y 81% de arena y entre 9 y 38% de grava, con lo cual se tiene arena con grava. Éstas presentan entre 3,4 y 8,6% de finos.

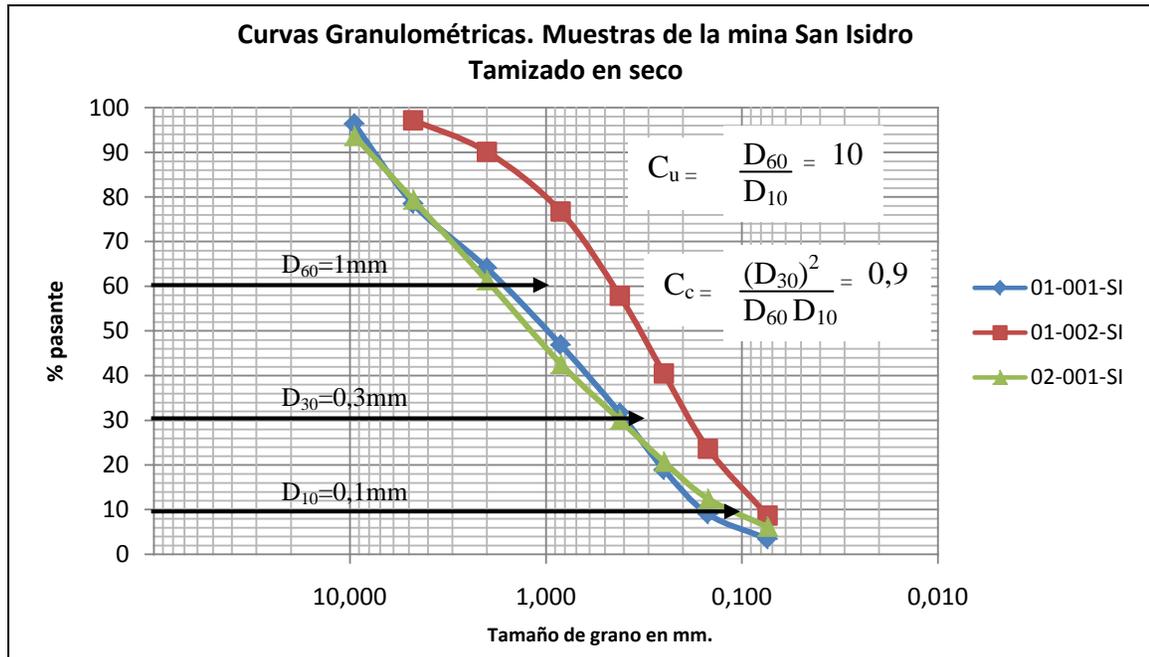


Figura 5.19 Curvas granulométricas. Muestras SI. Tamizado seco.

De acuerdo con Wagner (1957), dado que la fracción fina varía entre 5 y 12% se requiere el uso del símbolo doble. Los coeficientes calculados, de uniformidad o de Hazen,  $C_u$  y de curvatura  $C_c$ , se presentan en el gráfico 5.19. Los valores resultantes son 10 y 0,9, respectivamente. Para ser arenas bien gradadas deben cumplirse ambas condiciones:  $C_u > 6$  y  $1 < C_c < 3$ . En este análisis  $C_c$  se encuentra en el límite inferior de la segunda condición, porque resultó menor que 1.

Esto es indicativo de que las muestras recuperadas en SI son mal gradadas y dado que la prueba de tenacidad realizada a la fracción fina de las mismas indicó ausencia de plasticidad, las arenas con grava resultan mal gradadas, limosas, SP-SM.

♣ Muestras de la Mina Los Barrancos

Los resultados se muestran en la tabla 5.5 y en la figura 5.20.

Tabla 5.5 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LB. Tamizado seco

Muestras	Tipo de Suelo				Resultado tipo de suelo, CUS
	Suelo grueso en %			Suelo fino en %	
	Gravas	Arenas			
		gruesa	fina		
01-001-LB	49,775	12,463	19,976	17,789	Grava limosa, GM
01-002-LB	15,329	11,335	42,122	50,309	Limo arenoso, ML
01-003-LB	2,832	6,716	40,143	42,549	Arena fina limosa, SM
02-001-LB	9,438	9,240	26,264	55,058	Limo arenoso, ML
02-002-LB	24,492	8,004	47,640	19,804	Arena fina limosa, SM
03-001-LB	38,237	9,916	39,474	12,373	Arena con grava, con pocos finos
03-002-LB	47,624	20,290	21,847	10,239	Grava arenosa, con pocos finos

Las muestras tienen una distribución de tamaños muy variada de gruesos, entre 35% y 53% de arena y entre 9 y 38% de grava, con lo cual se tienen gravas arenosas, arenas finas limosas y limos arenosos. Éstas presentan entre 10 y 55% de finos.

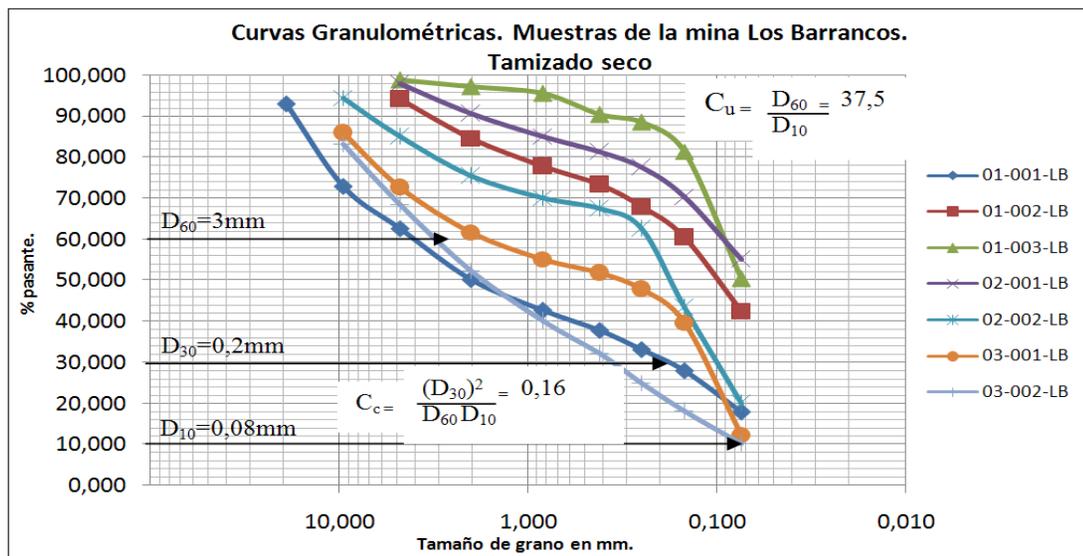


Figura 5.20 Curvas granulométrica. Muestras LB. Tamizado seco

Dado que en algunas muestras la fracción fina en las varía entre 5 y 12% se requiere el uso del símbolo doble. Los coeficientes de uniformidad o de Hazen, Cu y de curvatura Cc, se muestran en el gráfico 5.20. Los valores resultantes son 37,5 y 0,16,

respectivamente. Para ser arenas y gravas bien gradadas deben cumplirse ambas condiciones:  $Cu > 6$  (para arenas),  $Cu > 4$  (para gravas) y  $1 < Cc < 3$  para ambos. En este análisis  $Cc$  se encuentra muy por debajo de la tercera condición, porque resultó menor que 1.

Esto es indicativo de que las muestras recuperadas en LB son mal gradadas y dado que la prueba de tenacidad realizada a la fracción fina de las mismas indicó ausencia de plasticidad, las arenas con grava y las gravas arenosas resultan mal gradadas, (GP – SP)

♣ Muestras de la Mina Las Pailas

Los resultados se muestran en la tabla 5.6 y las curvas granulométricas se presentan en la figura 5.21

*Tabla 5.6 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LP. Tamizado seco*

Muestras	Tipo de Suelo				Resultado tipo de suelo, CUS
	Suelo grueso en %			Suelo fino en %	
	Gravas	Arenas			
		gruesa	fina		
01-001-LP	43,438	18,505	31,129	6,928	Arena fina con grava
01-002-LP	12,477	13,006	49,959	27,558	Arena fina limosa, ML

Las muestras tienen una distribución de tamaños de gruesos, de 43% y 12% de grava y entre 50 y 63% de arena, con lo cual se tienen arena fina con grava y arena fina limosa (ML). Éstas presentan entre 7 y 28% de finos.

Según Wagner (1957), ya que la fracción fina de 01-001-LP varía entre 5 y 12% se requiere el uso del símbolo doble. Los coeficientes calculados, de uniformidad o de Hazen,  $C_u$  y de curvatura  $C_c$ , se presentan en el gráfico 5.21. Los valores resultantes son 33 y 1,1 respectivamente. Para ser arenas bien gradadas deben cumplirse ambas condiciones:  $C_u > 6$  y  $1 < C_c < 3$ .

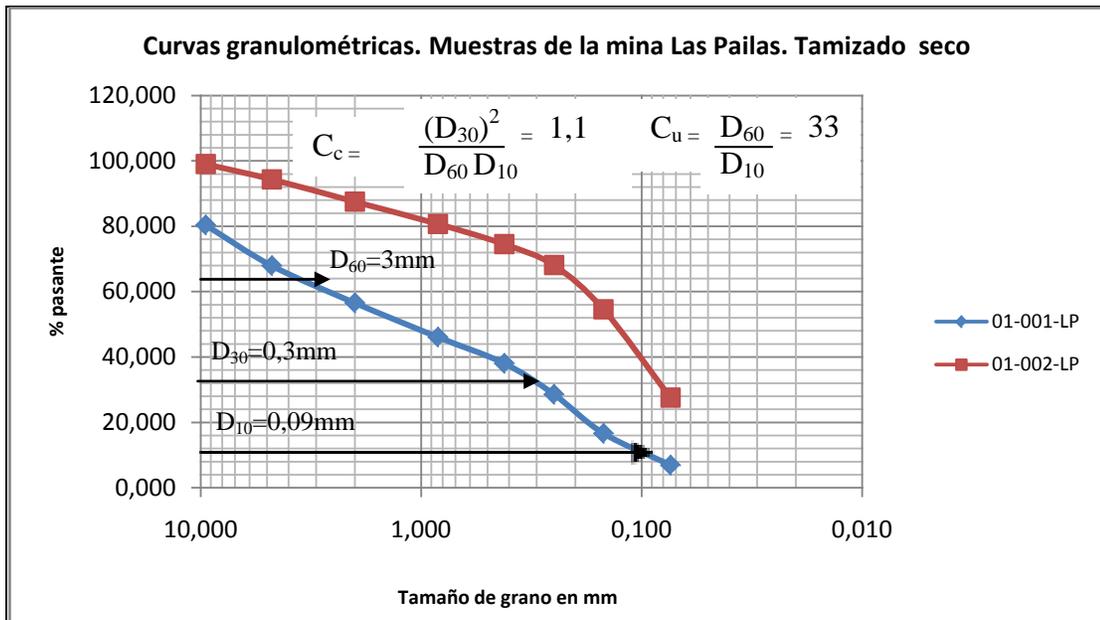


Figura 5.21 Curvas granulométricas. Muestras LP. Tamizado seco.

En este análisis los dos (2) coeficientes cumplen la condición entonces se tiene arena fina con grava bien gradada, con pocos finos (SW).

**Tamizado, en húmedo (por lavado)**

El ensayo granulométrico por vía húmeda se realizó con los tamices números: N° 20, N° 40, N° 60, N° 100, y N° 200, según norma ASTM E-11. Para el análisis de resultados se usó la misma clasificación CUS (Ugas, 1985). Luego del lavado de las muestras, todo el pasante era inferior al tamiz N°10, resultando, en general, sólo granulares con tamaño de arena y contenido de grava poco significativo. De allí que se puede inferir el alto grado de delezabilidad de las muestras analizadas debido a la litología predominante en explotación mineral, conocidas como menas friables.

**♣ Muestras mina San Isidro (SI)**

Los resultados se muestran en la tabla 5.7 y las curvas granulométricas se presentan en la figura 5.22.

**Tabla 5.7 Resultados de clasificación de suelos. Muestras SI. Tamizado húmedo**

Muestras	Tipo de Suelo			Resultado tipo de suelo, CUS	
	Suelo grueso en %		Suelo fino en %		
	Gravas	Arenas			
		gruesa	finas		
01-001-SI		23,971	31,724	44,305	Arena fina limosa, SM
01-002-SI		21,921	46,890	31,189	Arena fina limosa, SM
02-001-SI		20,228	34,850	44,922	Arena fina limosa, SM

Las muestras tienen una distribución de tamaños de gruesos, entre 56% y 69% de arena y entre 31 y 45% de finos. De acuerdo con Ugas (1985) como las muestras presentan más de 12% de finos (pasante malla 200) y su índice de plasticidad es menor que cuatro (4) entonces se tiene arena fina limosa SM.

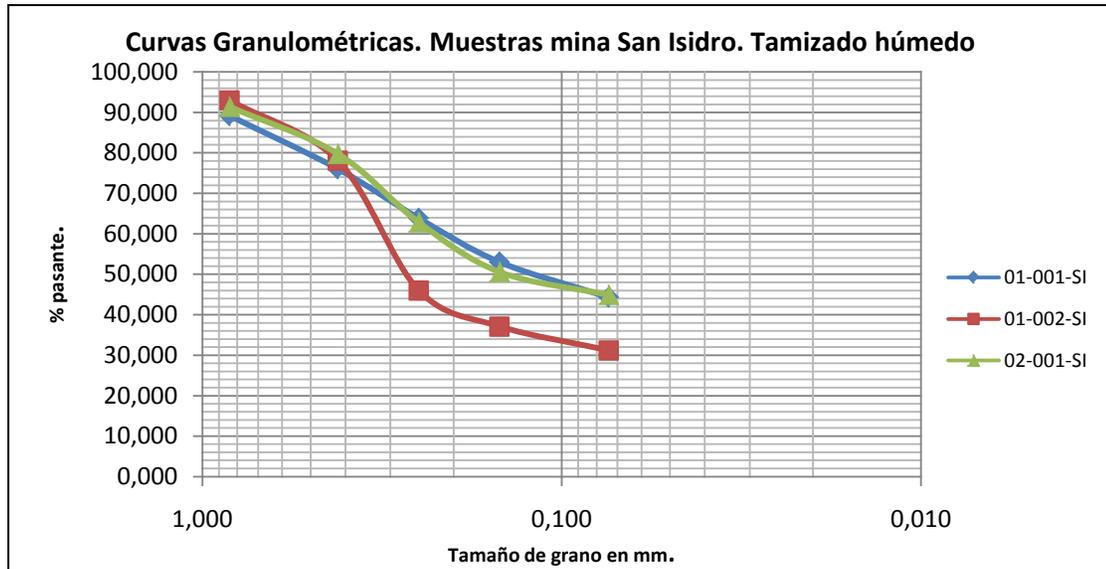


Figura 5.22 Curvas granulométricas Muestras SI. Tamizado húmedo.

En estas muestras los coeficientes de uniformidad o de Hazen,  $C_u$  y de curvatura  $C_c$ , no pueden ser calculados para distinguir la graduación ya que el porcentaje de finos es mayor a 31% y según Ugas (1985) las características de finos son más importantes.

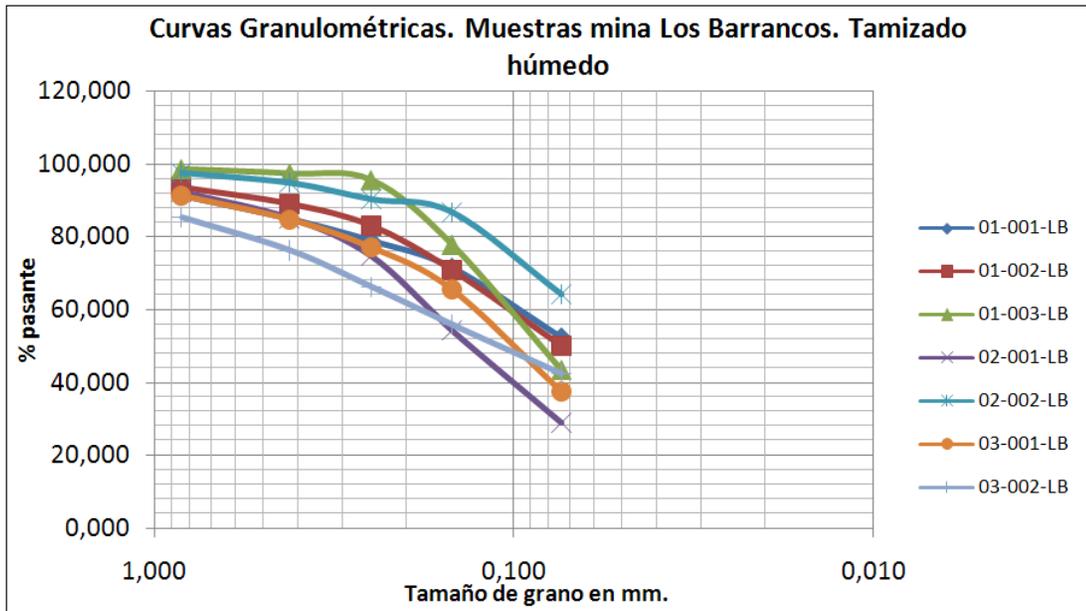
♣ **Muestras mina Los Barrancos (LB)**

Los resultados se muestran en la tabla 5.8 y las curvas granulométricas se presentan en la figura 5.23.

**Tabla 5.8 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LB. Tamizado húmedo.**

Muestras	Tipo de Suelo				Resultado tipo de suelo, CUS
	Gravas	Suelo grueso en %		Suelo fino en %	
		gruesa	fina		
01-001-LB		15,039	32,553	52,408	Limo arenoso, ML
01-002-LB		10,894	38,963	50,143	Limo arenoso, ML
01-003-LB		2,612	54,071	43,317	Arena limosa, SM
02-001-LB		15,072	56,108	28,820	Arena limosa, SM
02-002-LB		5,354	30,593	64,053	Limo arenoso, ML
03-001-LB		15,388	47,113	37,499	Arena limosa, SM
03-002-LB		23,971	31,724	42,547	Arena limosa, SM

Las muestras tienen una distribución de tamaños de gruesos, entre 71% y 35% de arena y entre 29 y 64% de finos. Se tienen entonces limo arenoso y arena limosa, ML y SM, respectivamente.



**Figura 5.23 Curvas granulométricas muestras LB. Tamizado húmedo**

De las curvas granulométricas se desprende que los rangos de variación para tamaños menores de arena gruesa son constantes, en el orden del 36% y se observan dos grupos de materiales con tendencias similares entre sí, resultando en arena limosa y limo arenoso, que representan suelos friccionantes con restricciones significativas desde el punto de vista en la adhesión entre partículas.

♣ **Muestras mina Las Pailas (LP)**

Los resultados se muestran en la tabla 5.9 y las curvas granulométricas se presentan en la figura 5.24.

*Tabla 5.9 Resultados de clasificación de suelos. Muestras LP. Tamizado húmedo*

Muestras	Tipo de Suelo				Resultado tipo de suelo, CUS
	Suelo grueso en %			Suelo fino en %	
	Gravas	Arenas			
		gruesa	finas		
01-001-LP		16,294	60,851	22,855	Arena fina limosa (SM)
01-002-LP		14,540	44,209	41,251	Arena fina limosa (SM)

La distribución de gruesos varía entre 77% y 59% de arena y entre 22,85 y 41,25% de finos, resultando arena fina limosa (SM), similar a SI y a LB. En términos de erosión y arrastre el factor litológico es homogéneo, cambiando las condiciones morfológicas y de declividad hacia el interior de la fosa o hacia el exterior, o cauces receptores.

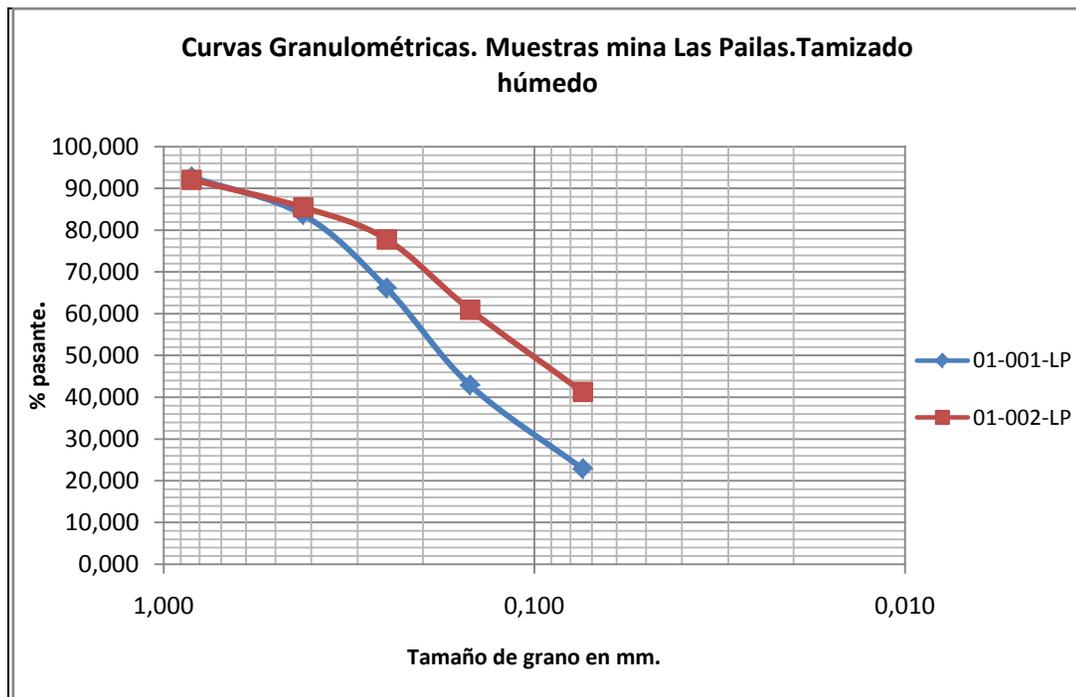


Figura 5.24 Curvas granulométricas. Muestras LP. Tamizado húmedo.

### Ensayo de hidrómetro

Los ensayos para determinación de tamaño de partículas finas fueron realizados con hidrómetro 152 H, según norma ASTM E-100. De acuerdo con Ugas (1985) la división de suelos fino se realiza en el tamiz o malla N° 200 y la frontera entre limos y arcilla es 0,005mm. Los resultados por mina se presentan a continuación:

#### ♣ Muestras mina San Isidro (SI)

Los resultados se muestran en la tabla 5.10 y las curvas granulométricas se presentan en la figura 5.25.

*Tabla 5.10 Resultados de clasificación de suelos. Muestras en SI. Hidrómetro*

Muestras	Suelo fino		
	Limos %	Arcillas %	Suelo fino en %
<b>01-001-SI</b>	34,165	10,140	44,305
<b>01-002-SI</b>	30,121	1,068	31,189
<b>02-001-SI</b>	30,601	14,321	44,922

El porcentaje de la fracción fina varía entre 31 y 45%, de ésta, entre 1 y 14% son arcillas y entre 30 y 34% son limos, lo cual ratifica la clasificación de SM resultante en la mina SI. Este material tiende a presentar el comportamiento netamente friccionante y susceptibilidad al arrastre dado los factores condicionantes.

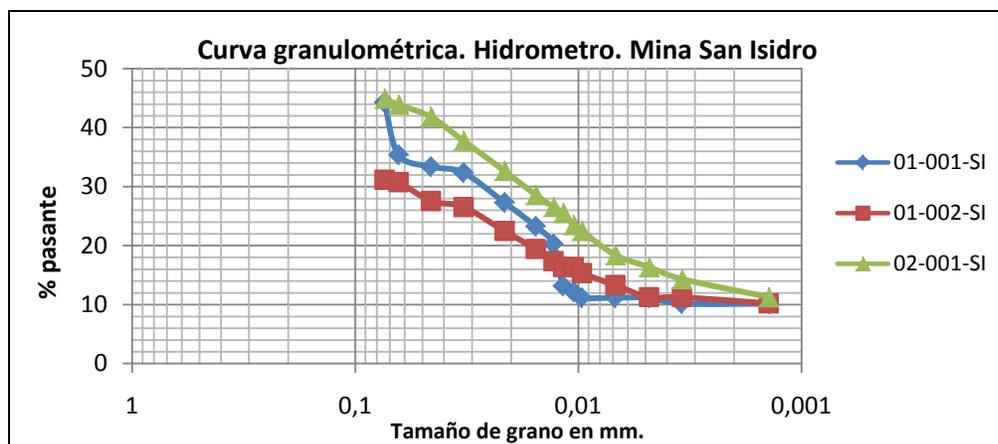


Figura 5.25 Curvas granulométricas de ensayo de hidrómetro. Muestras en SI.

♣ **Muestras mina Los Barrancos (LB)**

Los resultados se muestran en la tabla 5.11 y las curvas granulométricas se presentan en la figura 5.26.

*Tabla 5.11 Resultados de clasificación de suelos. Muestras en LB. Hidrómetro.*

Muestras	Suelo fino		
	Limos %	Arcillas %	Suelo fino en %
<b>01-001-LB</b>	45,208	7,200	52,408
<b>01-002-LB</b>	42,640	7,503	50,143
<b>01-003-LB</b>	36,805	6,512	43,317
<b>02-001-LB</b>	22,308	6,512	28,820
<b>02-002-LB</b>	57,140	6,910	64,053
<b>03-001-LB</b>	31,470	6,030	37,499
<b>03-002-LB</b>	33,490	9,057	42,547

Los valores de fracción fina encontrados en mina LB muestran que estos varían entre 64% y 29%, lo cual indica que estos suelos poseen cantidades significativas de finos. De estos porcentajes entre 22 y 57% son limos, mientras que entre 6 y 9% son arcillas, siendo la variación del porcentaje de limos más alto que el de las arcillas. Se esperaría que la erosión en este suelo fuese ligeramente menor que en mina SI.

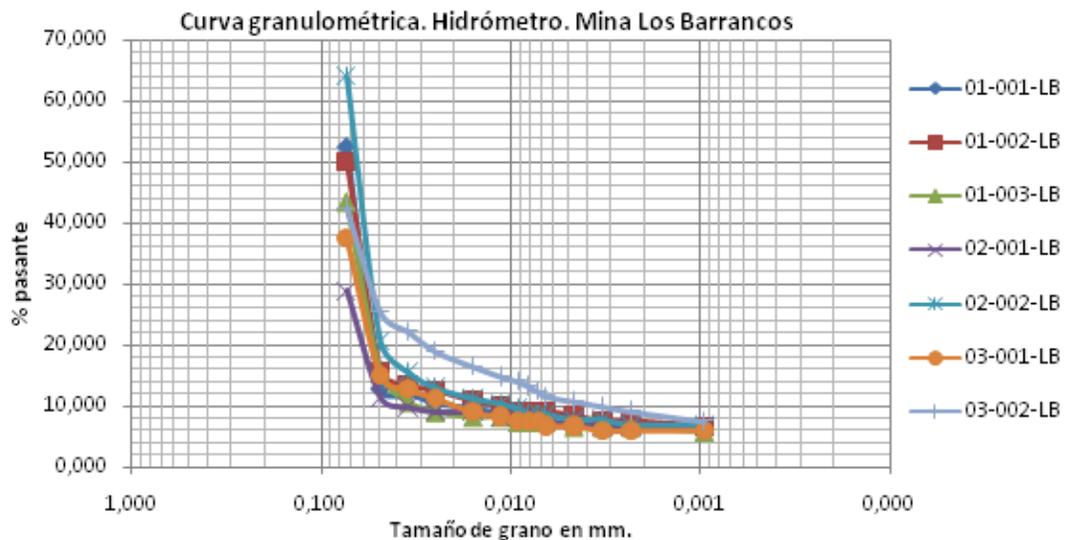


Figura 5.26 Curvas granulométricas de ensayo de hidrómetro. Muestras en LB.

♣ **Muestras mina Las Pailas (LP)**

Los resultados se muestran en la tabla 5.12 y las curvas granulométricas se presentan en la figura 5.27.

*Tabla 5.12 Resultados de clasificación de suelos. Muestras en LP. Hidrómetro.*

Muestras	Suelo fino		
	Limos %	Arcillas %	Suelo fino en %
<b>01-001-LP</b>	14,722	8,132	22,855
<b>01-002-LP</b>	34,577	6,674	41,251

Los valores de la fracción fina son 22,85 y 41,25%; de éstos los limos varían entre 14,72 y 34,57 % y las arcillas entre 8,13 y 6,67%. Como ya se comentó el comportamiento en mina LP es similar a mina SI.

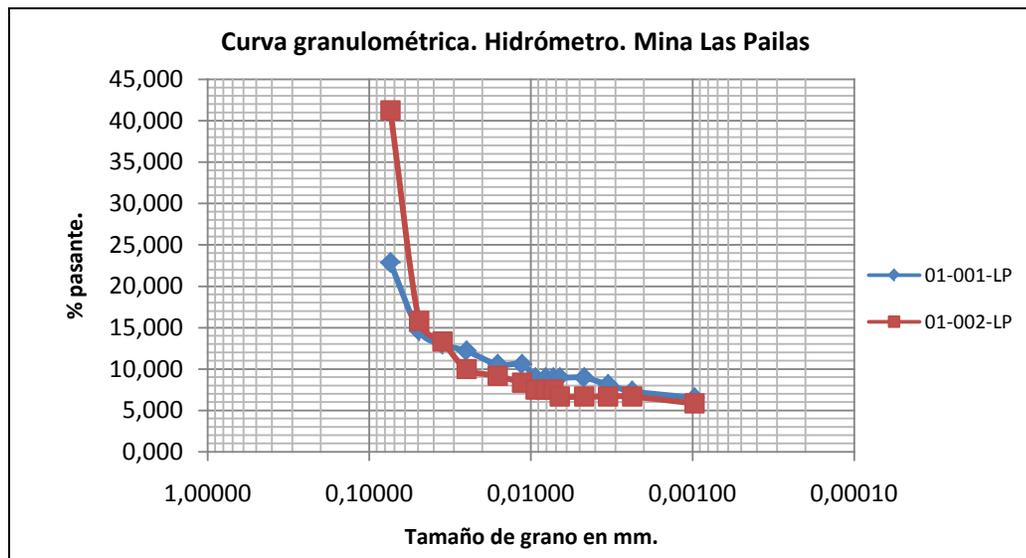


Figura 5.27 Curvas granulométricas de ensayo de hidrómetro. Muestras en LP.

La intención de estos ensayos fue caracterizar físicamente los suelos que por acción de las aguas de escorrentía son transportados a los cauces naturales de las cuencas. Al ser clasificados como “arenas finas limosas”, con porcentaje promedio de limo en 34,43%, permite indicar que estos sedimentos, estarán suspendidos en las quebradas, provocando el color marrón de sus aguas, como el observado en la figura 5.13

presentada en la sección relacionada con la erosión de suelos. En este sentido se ratifica la recomendación de actualizar los sistemas de drenaje y mejorar las estructuras de retención de sedimentos existentes.

Los ensayos de tamizado en seco y el hidrómetro fueron realizados en el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), de la Facultad de Ingeniería, UCV. La figura 5.28 muestra parte del proceso de medición con hidrómetro en el IMME.



Figura 5.28 Medición con hidrómetro

### **Comparación entre tamizado seco y tamizado húmedo**

La comparación entre las curvas granulométricas del tamizado seco contra el tamizado por vía húmeda permitió comparar la cantidad de finos reportada en cada ensayo, las diferencias se presentan a continuación:

En el análisis por vía seca en el cerro SI la cantidad de finos fue en promedio 6,11%, menor que la cantidad reportada por vía húmeda 40,13%. Las curvas granulométricas se muestran en la figura 5.29.

En el caso de LB el valor promedio de finos en el tamizado seco fue 29,73%, mientras que en húmedo fue de 45,74%. La figura 5.30 presenta las curvas granulométricas.

Para las muestras de LP el promedio de finos obtenido mediante el tamizado seco fue 17,24% y en húmedo 32,05%. En la figura 5.31 se observan las curvas granulométricas.

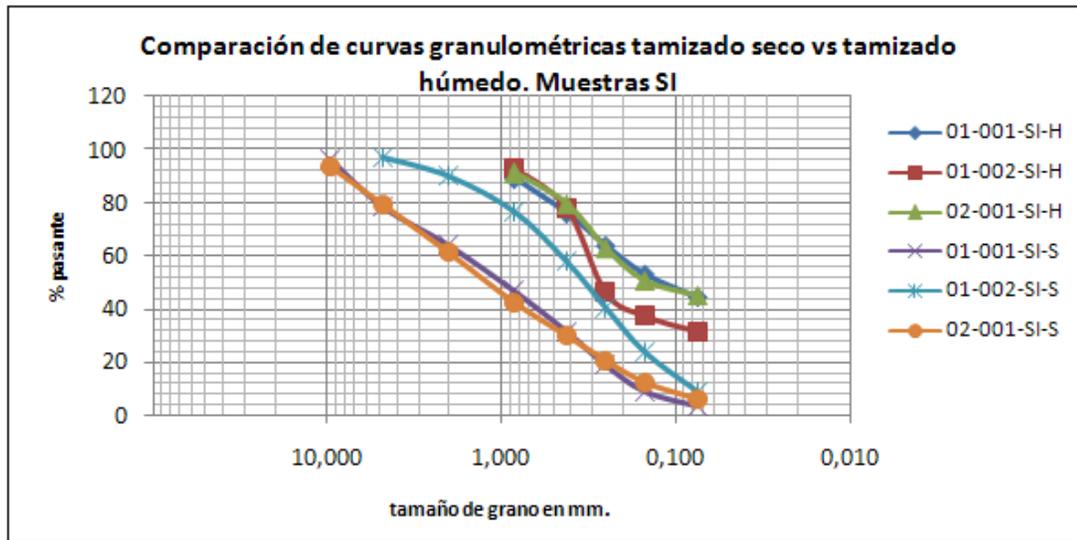


Figura 5.29 Comparación entre análisis por tamizado por vía seca y con lavado. Muestras SI

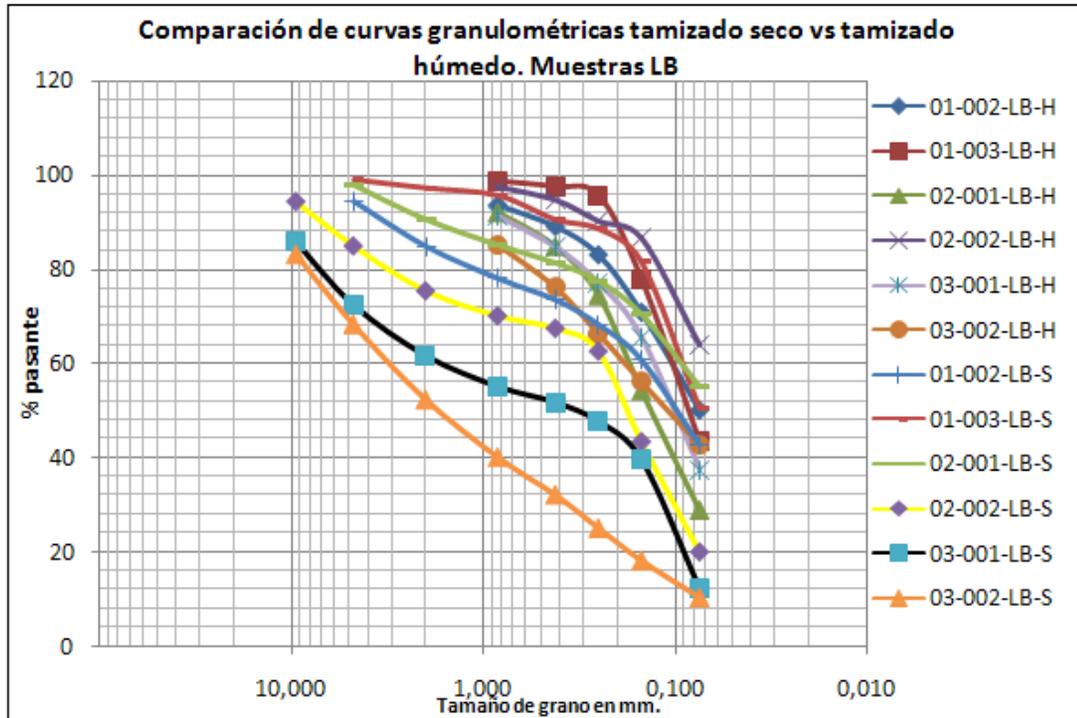


Figura 5.30 Comparación entre análisis por tamizado por vía seca y con lavado. Muestras LB

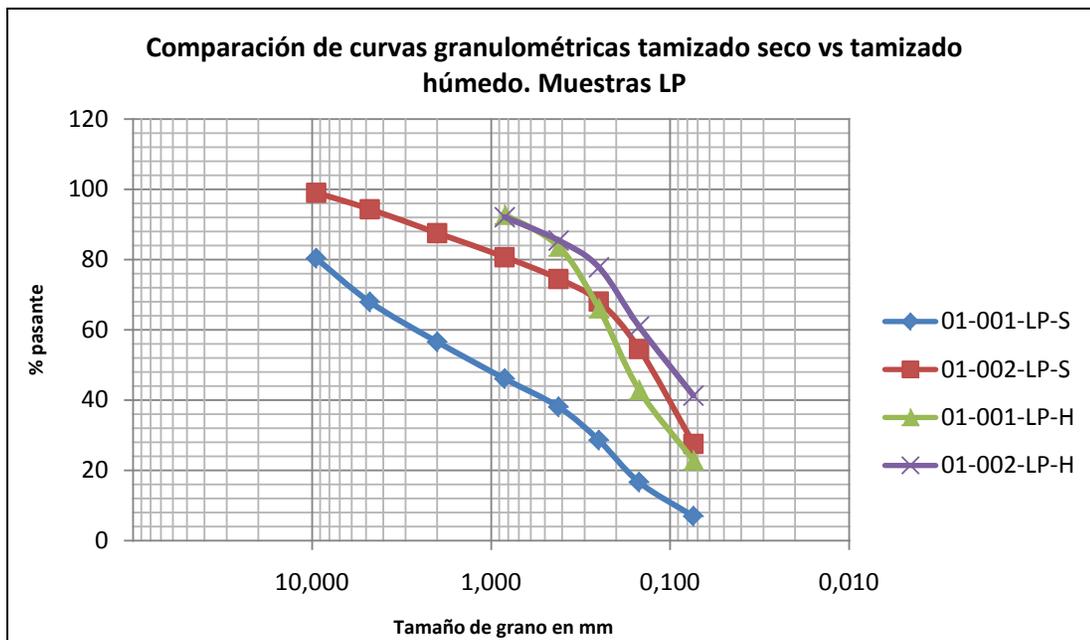


Figura 5.31 Comparación entre análisis por tamizado por vía seca y con lavado. Muestras LP.

Evidentemente existe una diferencia notable en los valores promedio de finos (pasante 200), siendo menores en seco que en húmedo. Esto es debido al procedimiento; en el tamizado por lavado, en este caso la cantidad real de finos es obtenida por diferencia entre el peso inicial y el peso luego de ser lavada la muestra.

Teniendo en cuenta la aparente deleznablez de las muestras, lo cual explica la diferencia notable entre los valores obtenidos, entonces la pregunta es cuál procedimiento utilizar y la respuesta se enfoca en la finalidad del ensayo granulométrico. Los estudios realizados en la mina, hasta la fecha, han utilizado el procedimiento en seco. No obstante, las condiciones reales de erosión y arrastre se producen cuando los suelos se saturan y escurre el agua ladera abajo. Esto tiene una consecuencia en términos económicos al aumentar las necesidades de medidas de control de sedimentos.

En el estudio clásico de suelos con fines de aprovechamiento mineral y las construcciones civiles, la determinación en seco es suficiente para establecer las

necesidades de reducción y clasificación de tamaños, liberación de minerales económicos y las estrategias de concentración mineral. Sin embargo, en la gestión ambiental, y más específicamente, en la conservación de la cuenca hídrica se requiere la determinación de las partículas finas en suspensión, las cuales pueden ser decantadas solamente con estrategias de retención de sólidos planificadas y diseñadas específicamente.

### **Determinación de límite líquido (LL) y límite plástico (LP)**

La determinación de los límites de consistencia se realizó con el pasante tamiz N° 40, los resultados para todas las muestras fueron:

Límite líquido = no poseen LL.

Límite plástico = suelo no plástico.

### **Determinación de peso específico**

Se realizó la determinación del peso específico (G) de todas las muestras de suelo. La prueba se realizó con dos (2) picnómetros, de 10 y 15 gr, marca Humboldt MFG, de 49,94 ml.TC/50ml a 20°C y 99,95 ml.TC/50ml a 20°C, respectivamente. En la figura 5.32 se pueden observar los picnómetros en la cámara de vacío durante la realización de los ensayos en el IMME.



Figura 5.32 Picnómetros con muestras en cámara de vacío.

Los resultados de los ensayos se presentan en las tablas 5.13 y 5.14.

*Tabla 5.13 Valores utilizados para determinación de peso específico (G).*

Capacidad del Picnómetro	MUESTRA	Nº Picnómetro	W (gr). Picnómetro Seco	W (gr). Muestra + Picnómetro	W (gr). Muestra + Picnómetro + Agua	T (° C)
15 gr	01-001-LB	592	48,361	63,473	159,774	27,8
	02-001-LB	618	47,325	62,300	158,375	28
	01-003-LB	596	47,948	63,064	158,947	28,2
	01-001-SI	592	48,361	63,547	157,281	28
	01-002-SI	618	47,325	62,514	156,195	28,2
	02-001-SI	596	47,948	62,690	156,400	27,8
10 gr	01-002-LB	355	32,584	42,685	89,981	28,2
	02-002-LB	356	32,676	42,482	89,537	28
	03-001-LB	364	32,160	42,300	90,280	28,8
	03-002-LB	355	32,584	43,580	90,726	28
	01-001-LP	356	32,676	42,700	90,156	28
	01-002-LP	364	32,160	42,156	89,369	27,8

*Tabla 5.14 Resultados de los ensayos de peso específico (G).*

MUESTRA	Nº Picnómetro	WS = W Muestra Seca	W1 = W (gr). Muestra + Picnóm. + Agua	T (° C)	W2 = W Picn. con agua (curva)	Peso específico (G) adimensional	a	K
01-001-LB	592	15,11200	159,77400	27,8	148,03156	<b>4,47589</b>	0,80	0,00940
02-001-LB	618	14,97500	158,37500	28,0	146,87480	<b>4,30098</b>	0,81	0,00967
01-003-LB	596	15,11600	158,94700	28,2	147,41222	<b>4,21247</b>	0,82	0,00962
01-001-SI	592	15,18600	157,28100	28,0	148,02560	<b>2,55550</b>	1,02	0,01389
01-002-SI	618	15,18900	156,19500	28,2	146,86962	<b>2,58520</b>	1,02	0,01396
02-001-SI	596	14,74200	156,40000	27,8	147,42538	<b>2,55099</b>	1,02	0,01411
01-002-LB	355	10,10100	89,98100	28,2	82,36162	<b>4,06218</b>	0,83	0,01005
02-002-LB	356	9,80600	89,53700	28,0	82,40240	<b>3,66339</b>	0,86	0,01775
03-001-LB	364	10,14000	90,28000	28,8	81,88856	<b>5,78746</b>	0,75	0,00804
03-002-LB	355	10,99600	90,72600	28,0	82,36580	<b>4,16344</b>	0,82	0,00989
01-001-LP	356	10,02400	90,15600	28,0	82,40240	<b>4,40625</b>	0,81	0,00953
01-002-LP	364	9,99600	89,36900	27,8	81,90736	<b>3,93630</b>	0,83	0,01026

Los resultados arrojaron valores promedio de G que pueden ser considerados altos: 4,38 en la mina LB; 4,17 en la mina LP; mientras que en las muestras de SI resultaron ser más bajos 2,56.

Según los valores encontrados se puede afirmar que en la composición de las muestras de LB y LP existen cantidades significativas de mena, que se pierden por las terrazas y laderas de los yacimientos, hacia los cauces de Arasiama y de Merecito, respectivamente. Éstas no son aprovechadas económicamente y generan los problemas de erosión descritos. Por otra parte, las muestras de SI, cuyo peso específico resultó mucho más bajo, indica que los suelos transportados que van a dar a la cuenca de la quebrada La Puertica no contienen menas ferríferas.

### **Ensayo de azul de metileno**

Se realizó el ensayo de azul de metileno, a seis (6) muestras de suelo provenientes del CFSI, con el apoyo del laboratorio de la consultora de ingeniería Centeno & Asociados.

La figura 5.33, muestra la realización del ensayo y las figuras 5.34, 5.35 y 5.36 la respuesta de la muestra al azul de metileno.



Figura 5.33 Realización de ensayo de azul de metileno.

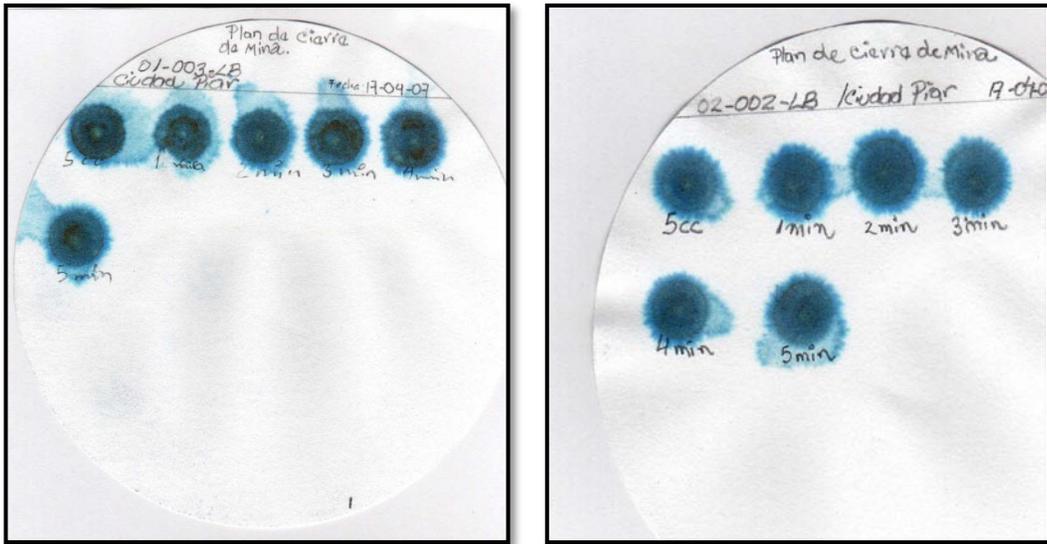


Figura 5.34 Respuestas de las muestras de LB al azul de metileno.

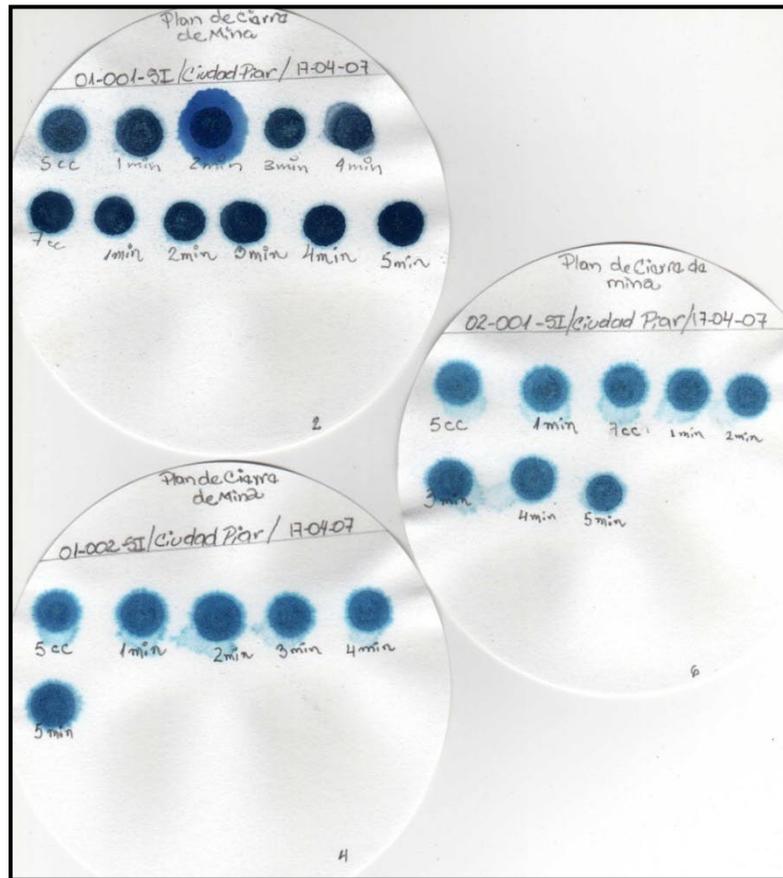


Figura 5.35 Respuestas de las muestras de SI al azul de metileno.

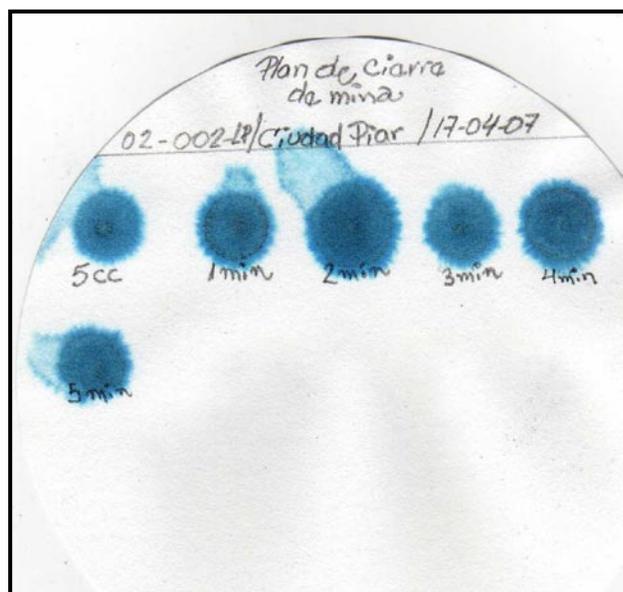


Figura 5.36 Respuesta de la muestra de LP al azul de metileno.

Los resultados se presentan en la tabla 5.15.

*Tabla 5.15 Resultados de ensayo - Azul de metileno.*

Muestra	01-003-LB	02-002-LB	01-001-SI	01-002-SI	02-001-SI	02-002-LP
<b>Índice de nocividad</b>	0,80	0,80	0,90	0,90	0,90	0,80
<b>Resultado</b>	Suelo no arcilloso					

En la escala de 0 a 10, los resultados obtenidos 0,80 y 0,90 representan un índice de nocividad muy bajo, siendo esto indicativo de la escasa presencia de arcilla en los suelos muestreados. Esto a su vez ratifica la clasificación de arena fina limosa y limo arenoso en las minas del CFSI.

Si se considera que este ensayo aporta una medida indirecta de la erosividad del suelo, entonces la baja nocividad implicaría que estos suelos son poco susceptibles a la erosión. Esto confirmaría la clasificación de Wagner (1957; en Lambe 1969 y Bell, 1981) para resistencia a la erosión en canales en función de la granulometría. Sin

embargo, las observaciones sobre erosión en CFSI, realizadas en campo y previamente mostradas, reflejan lo contrario.

En CFSI los procesos erosivos son evidentes, con lo cual se infiere que son otros factores como: la pendiente natural elevada, un diseño geométrico inadecuado, la litología altamente deleznable y friccionante, la erosividad de la lluvia, e incluso el elevado específico de las partículas y las vibraciones producidas por las voladuras, además de la sismicidad del área por el embalse de Guri. De allí que, con respecto a la erosión es necesario evaluar la multiplicidad de variables que influyen y determinan la afectación que tendrá que ser corregida para el nuevo uso del territorio.

Por otra parte, si se aplica la correlación de Krynine y Judd (1975), como se muestra en la figura 5.37, entonces las arenas finas limosas constituyen los materiales más susceptibles de ser transportados y erosionados. Esta condición explicaría las cantidades apreciables de partículas transportadas en el CFSI.

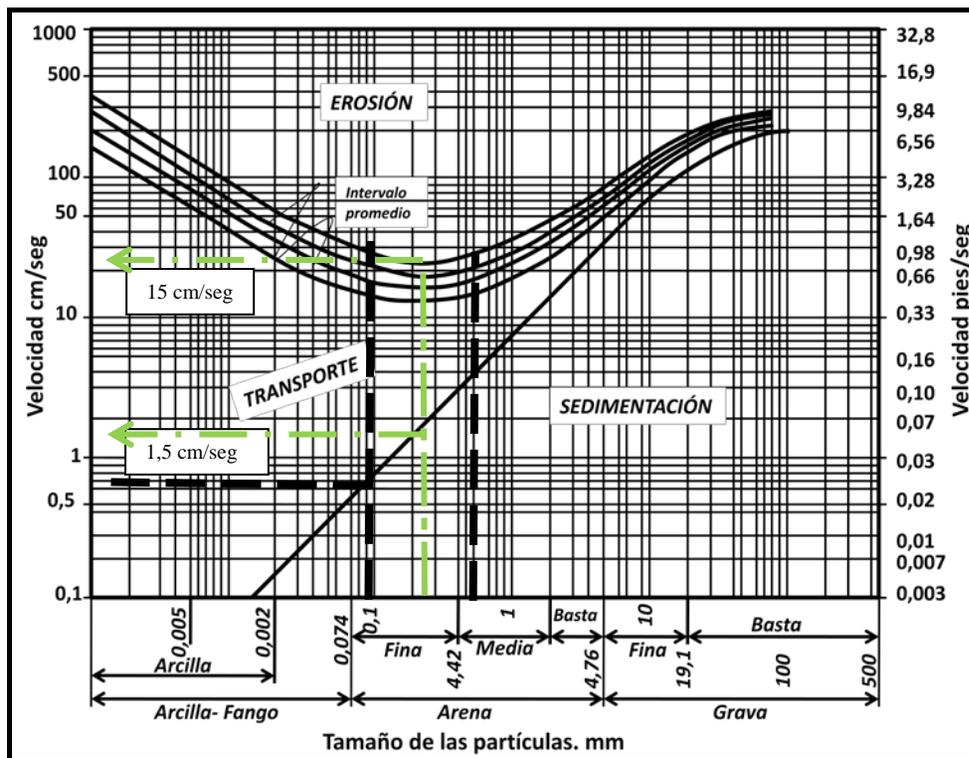


Figura 5.37 Correlación entre tamaño de partícula y velocidad.

En el eje de las abscisas, se tomó el punto medio del rango de arena fina y el límite entre sedimentación y transporte, obteniéndose que con velocidades de flujo superiores a 1,5 cm/seg se puede iniciar el transporte de partículas y con velocidades superiores a 15 cm/seg se erosionan estos suelos. A su vez, se encuentra que hacia la derecha, en el límite superior, la velocidad para el transporte aumenta a 3 cm/seg, mientras que a la izquierda, en el límite inferior, disminuye a 0,5 cm/seg. Esto es indicativo de que a mayor tamaño de partícula, mayor es la velocidad necesaria para movilizarlas.

El gráfico no indica el valor de  $G$  de las partículas sometidas a este criterio, por esta razón se tiene en cuenta que para suelos tipo SM de LB y LP ( $G$  igual a 4,38 y 4,17), las velocidades requeridas para ser erosionados pueden ser mayores. De esta forma CVG-FMO debe asumir como parte integral de su programa de control de erosión y sedimentación del CFSI, la caracterización completa, que incluya ensayos en las litologías aflorantes en los frentes de trabajo, con miras a la protección de las cuencas hídricas aledañas a los cerros en explotación.

### **5.2.3 Modelado de los cambios topográficos**

El modelado de los cambios topográficos del terreno fue realizado, en la oficina de Planificación y Desarrollo de Mina en Ciudad Piar, con el Programa MedSystem®. Este programa es un módulo del sistema desarrollado por la empresa Mintec, Inc. (*Mineral Technology*). En líneas generales, el programa permite al usuario seguir una serie de procedimientos que involucran la utilización de una estructura de archivos de programas. Cada uno de estos archivos almacena una porción específica de datos necesarios para el desarrollo del proyecto de mina (reservas, secciones verticales y horizontales, datos de producción y demanda mineral, precios, grados químicos, etc.). Este modelado corresponde al plan de explotación, a largo plazo, para el período 2006-2026, proyectado por CVG-FMO.

El modelado en tres dimensiones (3-D) permitió proyectar los cambios topográficos, año a año, desde el 2006 hasta el año 2026. Con esta información se observó la dinámica de la secuencia de explotación, las geoformas resultantes y las zonas agotadas que deben ser rehabilitadas.

Los archivos generados con el programa Medsystem fueron curvas de nivel con la cota atributada, por mina, en formato “dxf”, con el fin de poder manipularlos en distintos programas de graficación 3-D. Los cambios topográficos por mina son mostrados y descritos en la sección 5.3.1 (visualización de los cambios topográficos). La figura 5.38 presenta a la autora modelizando las minas con el software



Figura 5.38 Modelado con el software Medsystem, en la oficina de Planificación y Desarrollo de Mina en Ciudad Piar.

### **5.3 ETAPA 3. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN**

#### **5.3.1 Visualización de los cambios topográficos**

Se realizó la visualización de los modelos en 3-D en la etapa de oficina en Caracas. Debido a que el Departamento de Minas no cuenta con la licencia del *software* MedSystem, ni con un programa de graficación que permita visualizar los modelos generados, se efectuó la visualización con el programa de sistemas de información geográfica, ArcGis, de la marca ESRI®, con los módulos ArcMap y ArcScene.

La razón para utilizar el programa ArcGis es que permite, por medio de algoritmos de interpolación, generar una superficie sólida manipulable, llamada “modelo digital de elevación”, con la cual se pueden obtener perspectivas y animaciones, a partir de curvas de nivel con cota atributada, con las cuales se puede representar el terreno. Con el módulo ArcMap, las curvas de nivel, en formato “dxf”, fueron importadas a un archivo en formato “shp”, con el cual se creó el modelo digital de elevación. Éste fue visualizado y manipulado con el módulo ArcScene, ambos módulos de ArcGis.

Los modelos fueron generados año a año, es decir, fueron generados 26 archivos por cada mina. A modo de resumen y con el objetivo de presentar los cambios topográficos más representativos se muestra la visualización cada cinco (5) años.

Los resultados de los modelos se describen y presentan a continuación:

### **Mina San Isidro (SI)**

La primera topografía modelada fue la original, es decir, aquella antes de comenzar la actividad minera; mina SI fue morfológicamente una colina alargada y presentaba una cota máxima de 705, la misma se presenta en la figura 5.39. Seguidamente se modeló la topografía para conocer los cambios producidos hasta el año 2006. En éste, las operaciones mineras habían cortado el cerro hasta la cota 475, desarrollándose la explotación de mineral de hierro principalmente hacia la ladera sur, formando una fosa.

La irregularidad en los cortes de los bancos, producto de la ejecución inadecuada del diseño geométrico planificado para el yacimiento, generó problemas de doble y triple banqueo; creando problemas operativos al dejar zonas por debajo del nivel 610 sin acceso, inhabilitando la explotación de éstas (ver figura 5.40). Este efecto también fue descrito en la sección sobre movimientos de masas. La situación descrita obedeció a que este yacimiento contenía grandes reservas de menas de alto tenor,

razón por la cual se minaron zonas que no estaban planificadas, a corto y mediano plazo, para cumplir con las metas de producción.

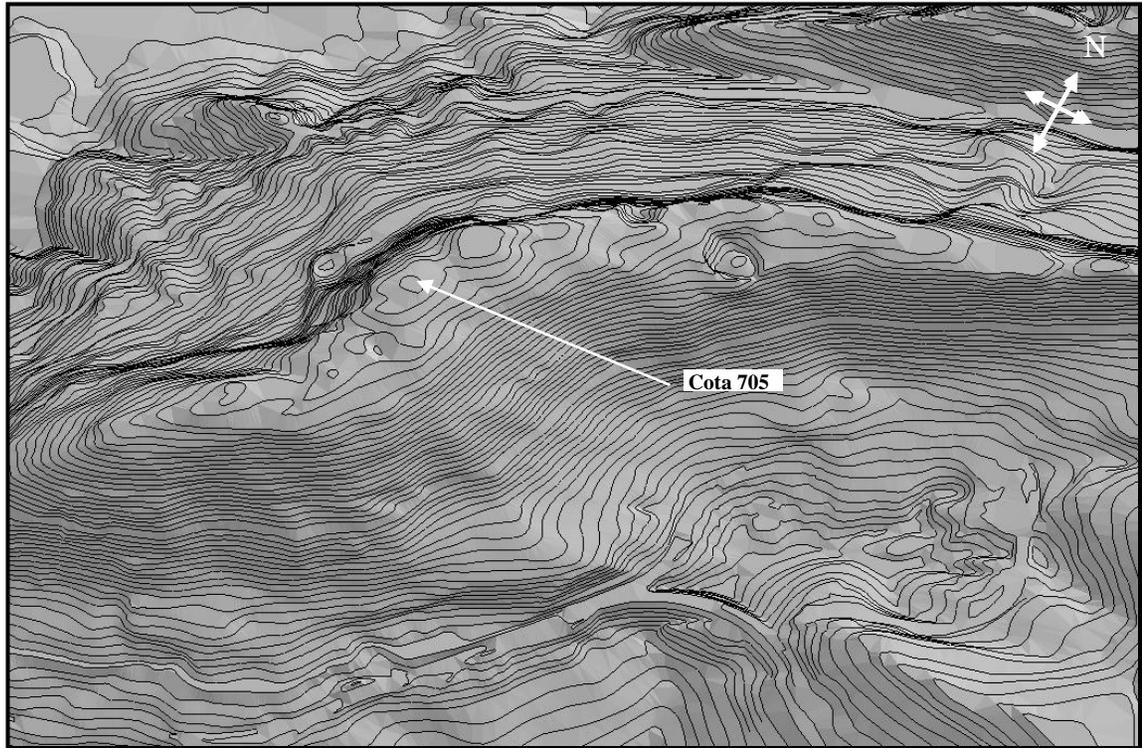


Figura 5.39 Topografía Original de la mina San Isidro

Las zonas donde los taludes son muy altos e irregulares, de 30 y 45 m, son lugares de potencial erosión; esta situación genera cantidades apreciables de materiales finos que son transportados, por las aguas de escorrentía, al fondo de la fosa en el nivel 475.

Al incluir criterios de cambio de uso del territorio con fines de planificar el cierre del yacimiento, en este año (2006) la operadora tiene grandes retos; uno de ellos es remover las grandes cantidades material para cumplir con el diseño geométrico que tienen planificado, sin disminuir la producción y la calidad de la cesta de productos; otro reto lo constituye la inclusión de aspectos de protección y remediación ambiental en la planificación a largo plazo.

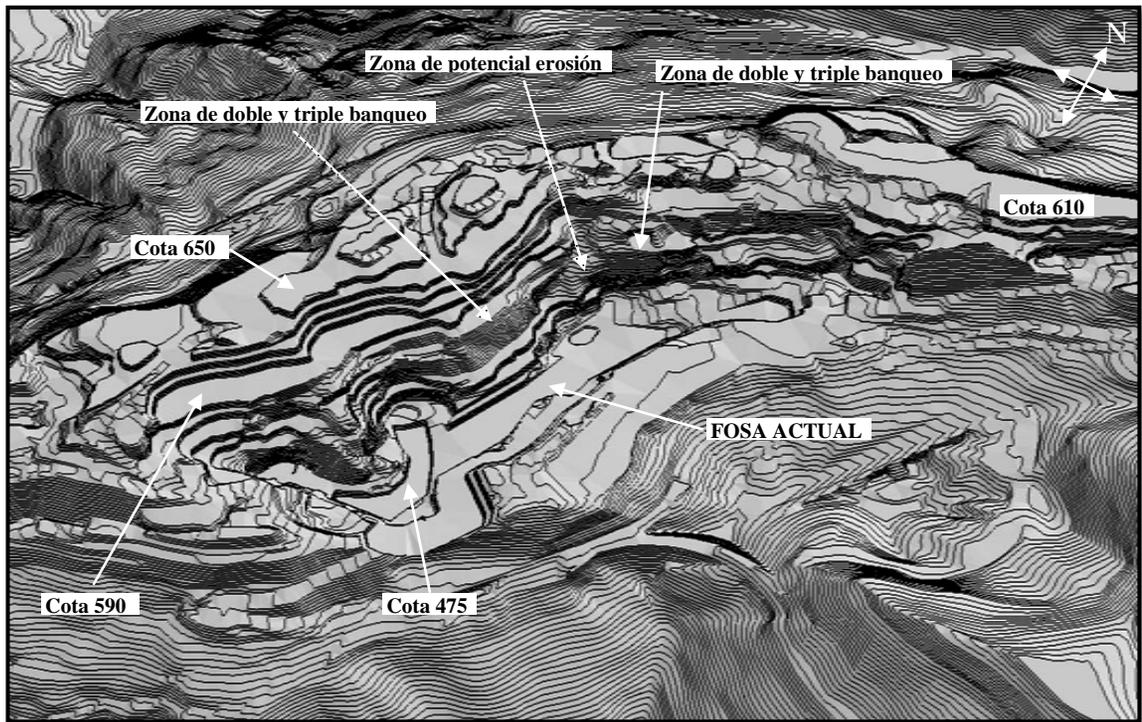


Figura 5.40 Mina San Isidro - año 2006.

La modelización para el año 2011 muestra que se ha saneado progresivamente la fosa de explotación, eliminado los pináculos remanentes de material, terraceando uniformemente a la cota 620 y se observa (ver la figura 5.41) el comienzo de la uniformidad en el diseño geométrico de la fosa, en su parte suroeste. Sin embargo en la parte noreste del yacimiento, entre las cotas 590 y 450, aun persisten las irregularidades en el desarrollo del *pit* de mina. Se evidencia en este modelo la intención de la operadora de mejorar la geometría del yacimiento, para facilitar y optimizar las actividades operativas de mina.

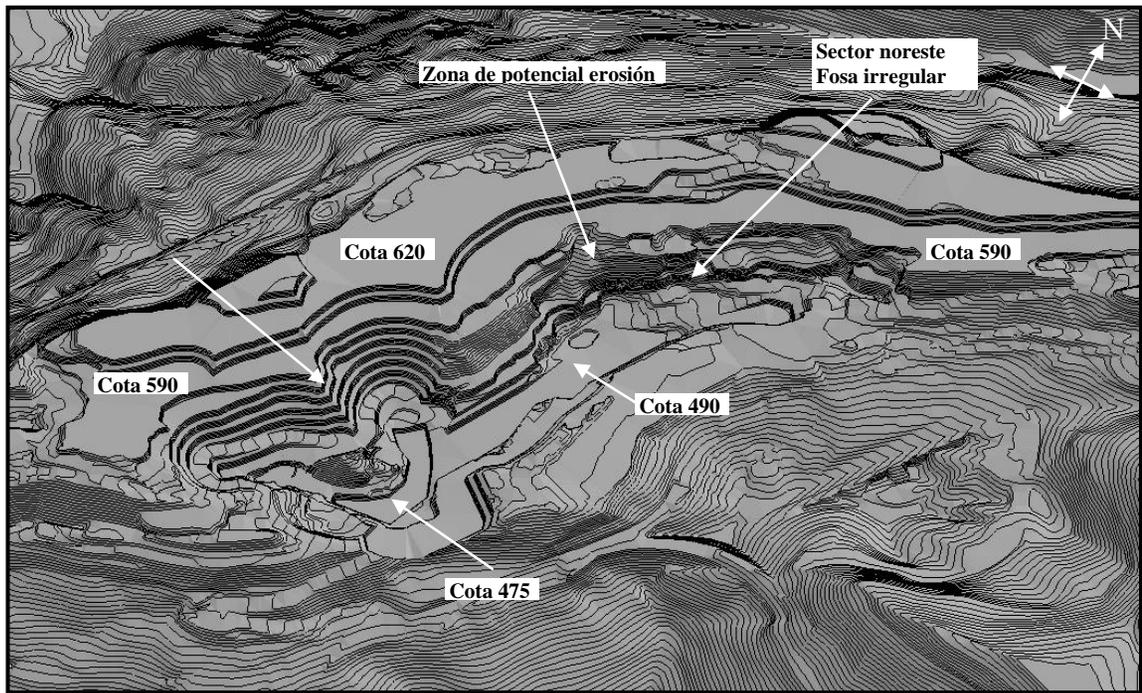


Figura 5.41 Mina San Isidro - año 2011

Hacia el año 2016 se continúa terraceando el cerro con el fin de seguir profundizando en la fosa principal y a su vez extraer material de la ladera noroeste del cerro mediante la generación de dos (2) pequeñas fosas secundarias hasta la cota 565 (ver figura 5.42). En la zona noreste de la fosa la irregularidad aun persiste, operativamente se tendrá que actualizar frecuentemente el sistema de drenaje para manejar las aguas de mina, en los lugares donde sea conveniente.

Con miras al cierre de esta mina se podría ir estudiando el nuevo uso que se le dará, ya que existen zonas que pudieran ser estabilizadas y revegetadas, a su vez se podrían comenzar a realizar ensayos en campo de adaptación de especies vegetales, siempre y cuando esta actividad esté acorde con el nuevo uso planificado.

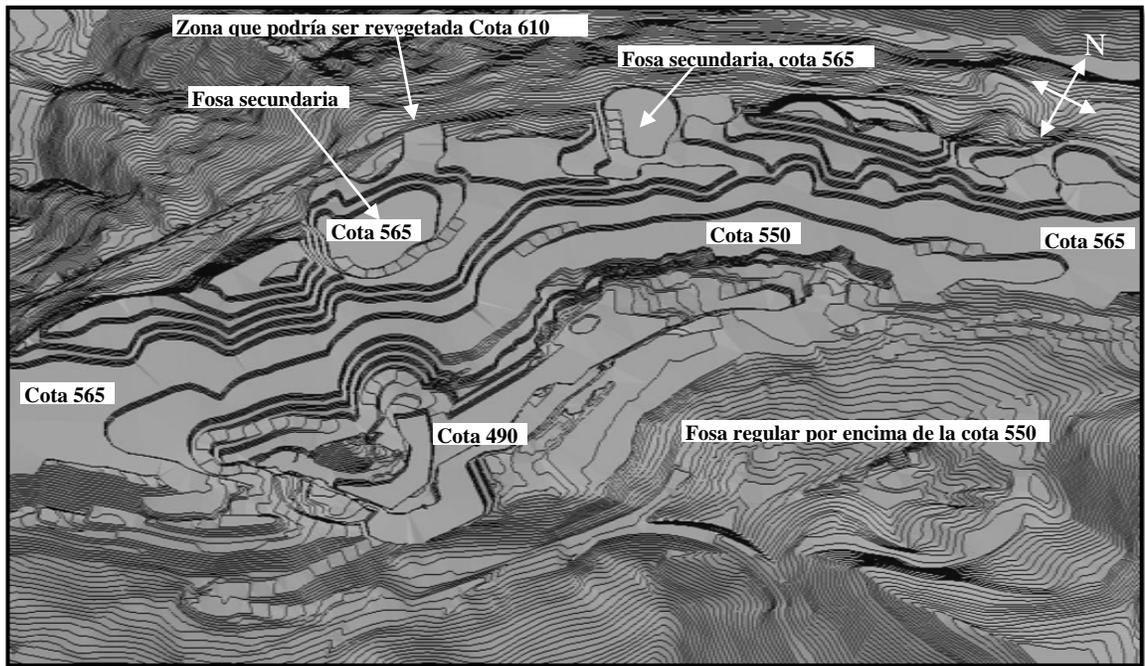


Figura 5.42 Mina San Isidro – 2016

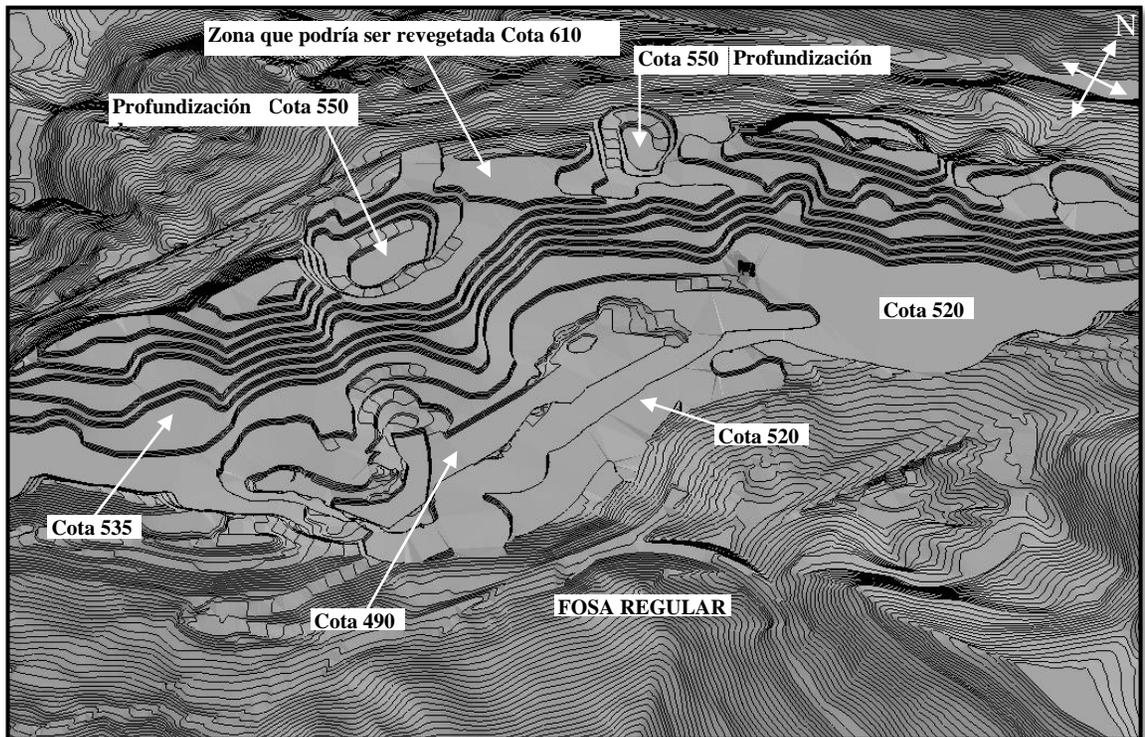


Figura 5.43 Mina San Isidro - año 2021

La figura 5.43 muestra la topografía para el año 2021, en ésta se profundizan las fosas secundarias de la ladera noroeste del yacimiento.

El modelo generado para el año 2026 presenta la uniformidad en la ejecución del banqueo en la fosa (ver figura 5.44), si se asume esta topografía como la final.

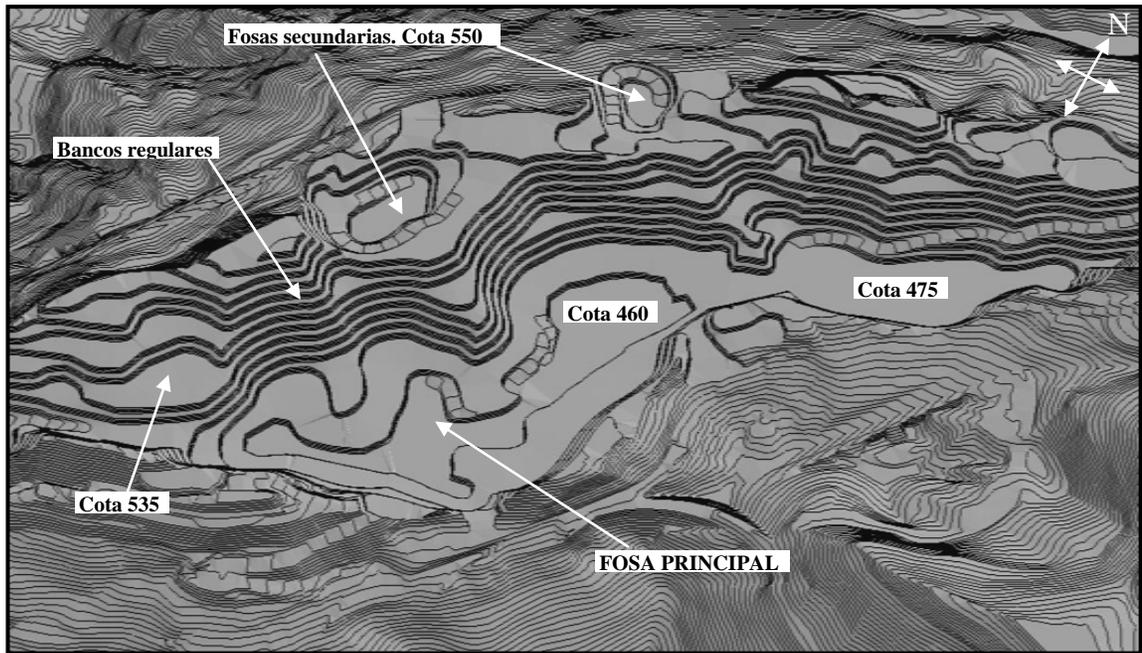


Figura 5.44 Mina San Isidro - año 2026.

En la figura 5.45 se muestra la topografía de la fosa final (*pit limit*) de excavación la misma llega a la cota 400, si se compara con la cota original, se tendrá que existe una diferencia de 305m.

En términos de nuevo uso, se puede proponer que el área se convierta en una zona recreativa, en donde la fosa principal se inunde y se cree un lago que, con la debida preparación del terreno, permita criar peces para consumo y comercio de las comunidades, como la pesca de las especies “pavón” (*peacock bass*) en el lago de Guri; también como área para la práctica de deportes acuáticos. Sería conveniente que la ladera noroeste fuese revegetada, porque desde Ciudad Piar esta vista es apreciada.

Toda la mina agotada puede ser convertida en mirador para el disfrute paisajístico y hasta turístico para los habitantes de las comunidades vecinas.

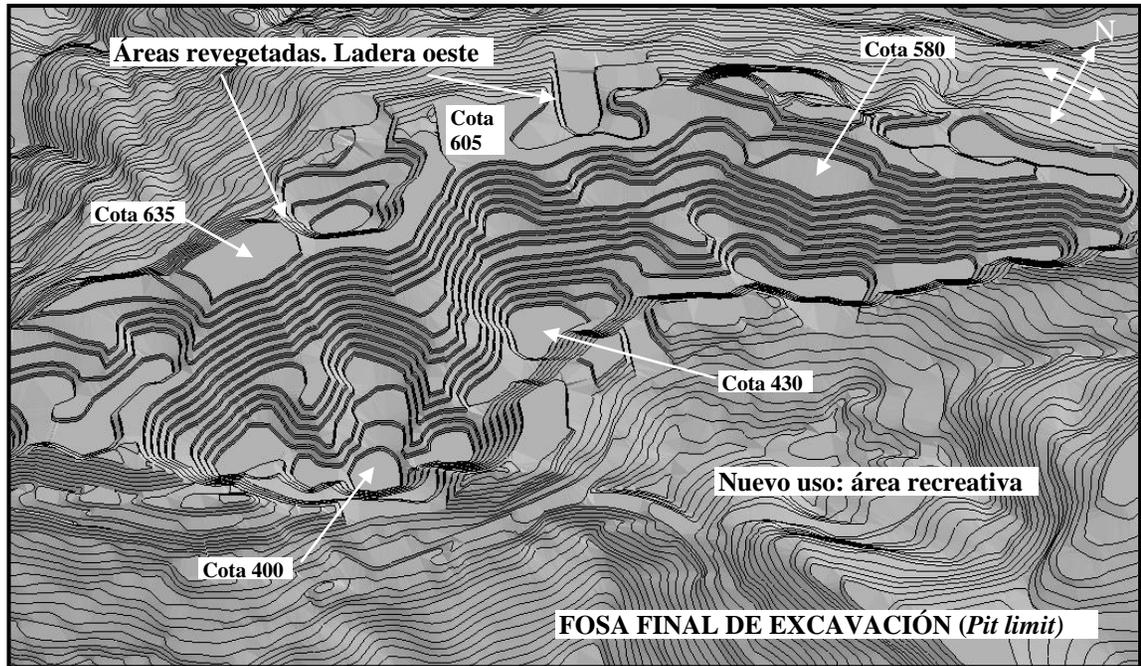


Figura 5.45 Mina San Isidro –Agotada.

### **Mina Los Barrancos**

La mina Los Barrancos es la más oriental del CFSI y la de mayor extensión, la figura 5.46 muestra una vista de la topografía de la mina antes de iniciar las operaciones mineras, la cota máxima era de 790, debido a la extensión del yacimiento, lo han dividido en dos (2) sectores: Los Barrancos I y Los Barrancos II. Al pie de la ladera de la Los Barrancos I se ubica la quebrada Arasiama, un tributario de la cuenca alta del río Arasiama. Y al noreste de Los Barrancos II se encuentra el lago de la represa de Guri.

El cerro original se caracterizaba como una fila larga y estrecha en dirección W-E y la explotación mineral va ensanchando la fila a niveles inferiores, desarrollando terrazas más espaciales, con desniveles y ofreciendo un corredor para tránsito vehicular,

manteniendo un desnivel importante para la cuenca visual sobre el lago de Guri, lo cual puede ser planificado como un eje con paradores turísticos.

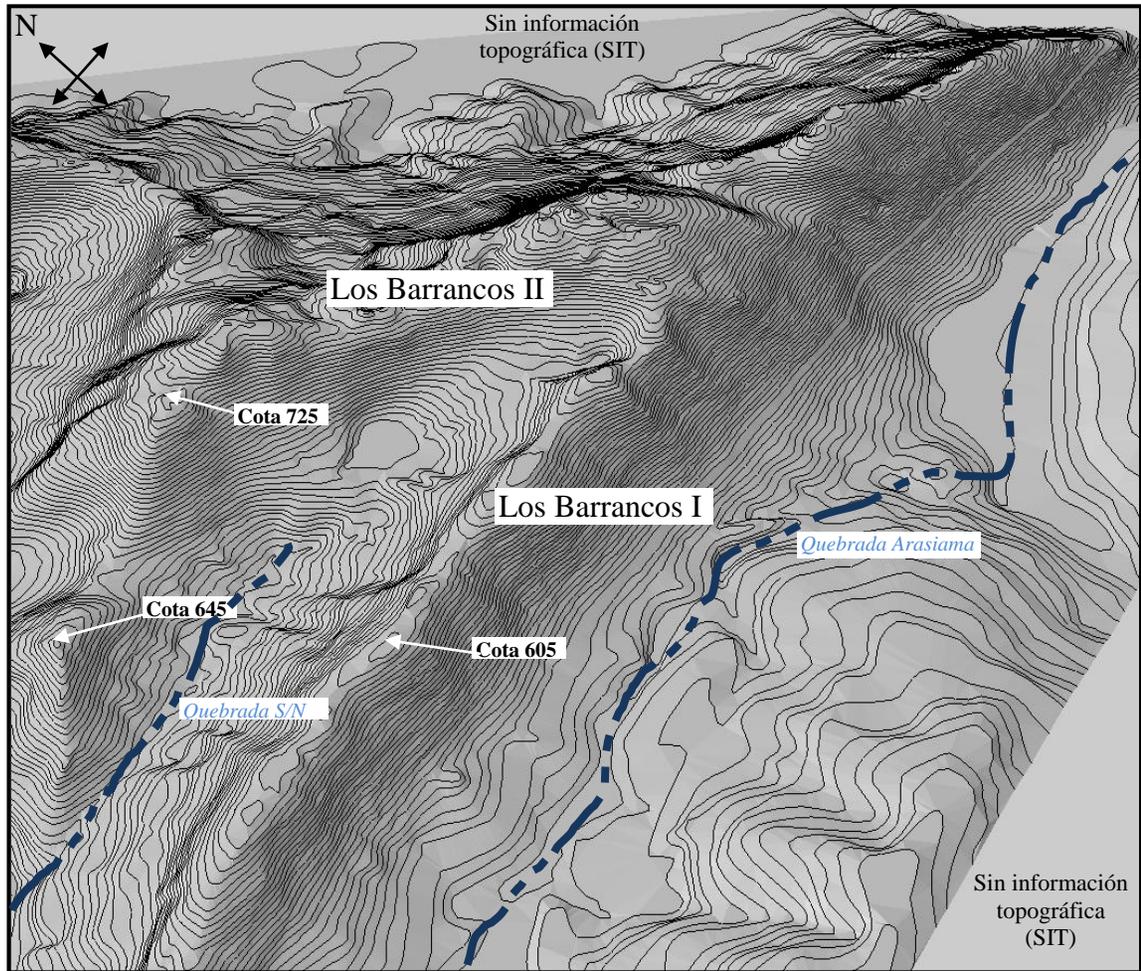


Figura 5.46 Topografía original de la mina Los Barrancos.

Hasta el año 2006 las actividades mineras habían terraceado el cerro en formas muy variadas, desarrollándose la explotación de Los Barrancos I, en la ladera sur, con bancos descendentes que van desde la cota 640 hasta la 580 (ver figura 5.47); y en Los Barrancos II, desde la cota 760 hasta la 685, creando pináculos de material remanente. Las flechas indican el sentido de explotación en la ladera. Si se planificara como un corredor turístico es fundamental la protección de los cauces naturales en pie de cerro, al pie de laderas, contra la colmatación con sedimentos transportados, a los fines de mantener la calidad del agua y del recurso estético.

Para ello, es importante iniciar de inmediato las acciones de retención de sólidos con el uso de canales de conducción de aguas, diques y cuencas de decantación, barreras vivas, entre otras y permitir la recuperación de las áreas afectadas, por regeneración natural. Las crecidas regulares continuarán transportando, aguas abajo, los sedimentados depositados y se inhibirán los nuevos aportes de sedimentos a las quebradas.

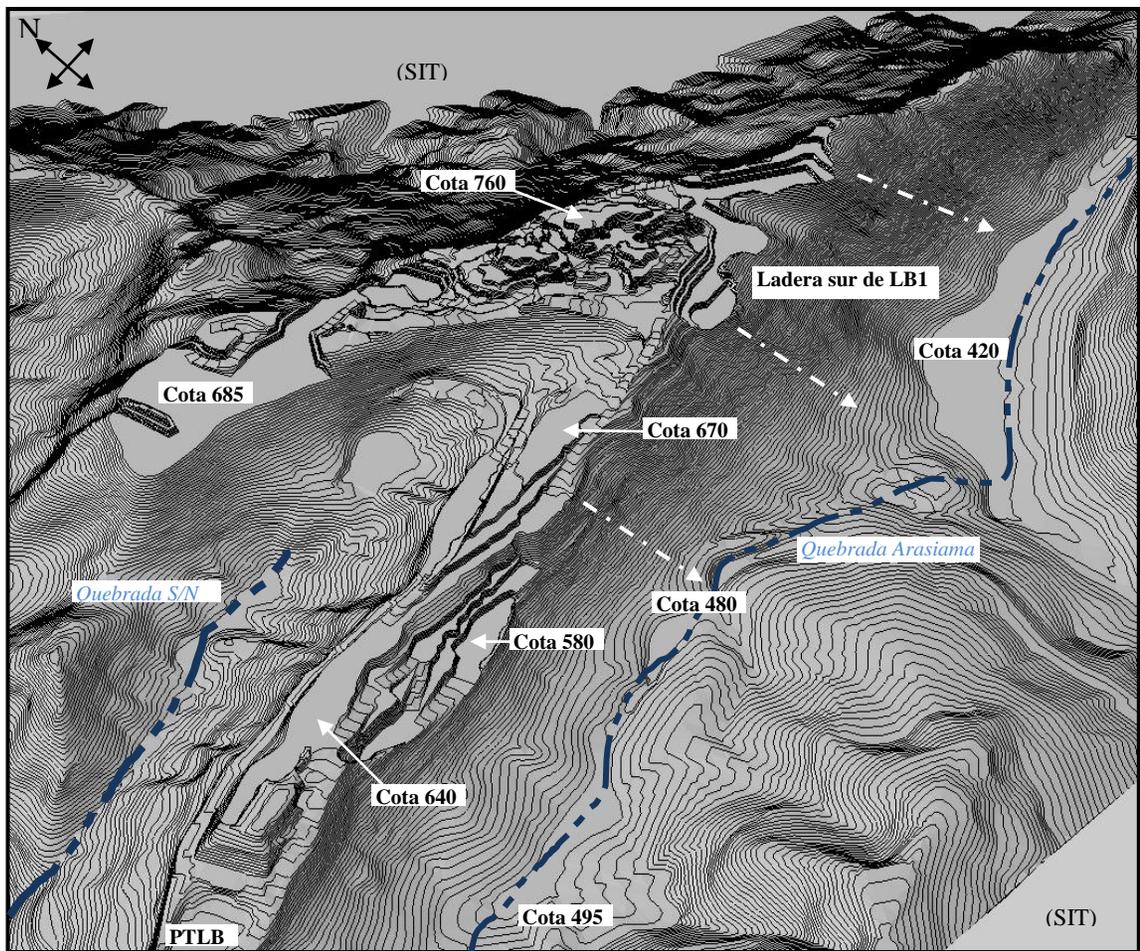


Figura 5.47 Mina Los Barrancos - año 2006.

La figura 5.48 permite ver que la explotación hacia el año 2011 continúa en Los Barrancos II, descendiendo hasta la cota 655, tratando de eliminar los pináculos de material avanzando hacia el este. Se observa la formación de una gran terraza en la

cota 670 y la expansión de las zonas minadas al este en la cota 655. Estas áreas espaciosas serían propicias para visualizar la oportunidad de un urbanismo a futuro, sabiendo que se mantendrá el desnivel topográfico, con una cuenca visual atractiva, con velocidades de vientos mayores, que hacen el clima más agradable. Además, sabiendo que se agotarán las reservas minerales y la cota final se alcanzará en litologías presumiblemente más estables y menos deleznable.

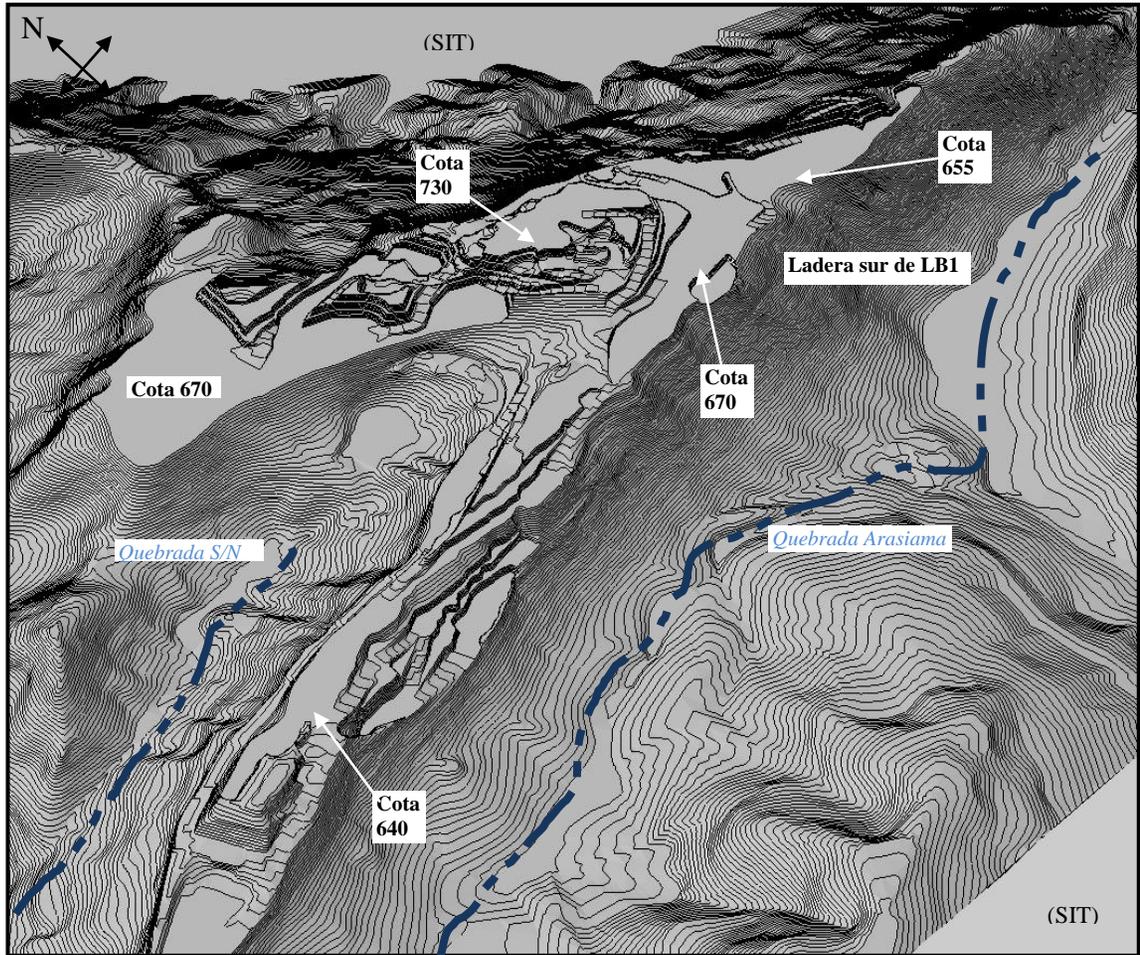


Figura 5.48 Mina Los Barrancos - año 2011.

Hacia el año 2016 continúa descendiendo la excavación en las laderas del cerro, las terrazas se presentan más amplias y los pináculos de material remanente han disminuido considerablemente. Dichas terrazas poseen cotas de 655 al noroeste y 640 al este. Los espacios cada vez más amplios permiten proyectar la visión de

movimientos de tierra para urbanismo en los topes de las colinas (ver figura 5.49). Pero, si continuara la carencia de los debidos controles del arrastre de sedimentos ladera abajo, el avance descendente de la explotación y la elevada pendiente continuarían favoreciendo la depositación en el lecho de la quebrada Arasiama, la cual se ubica aun en un nivel topográfico inferior.

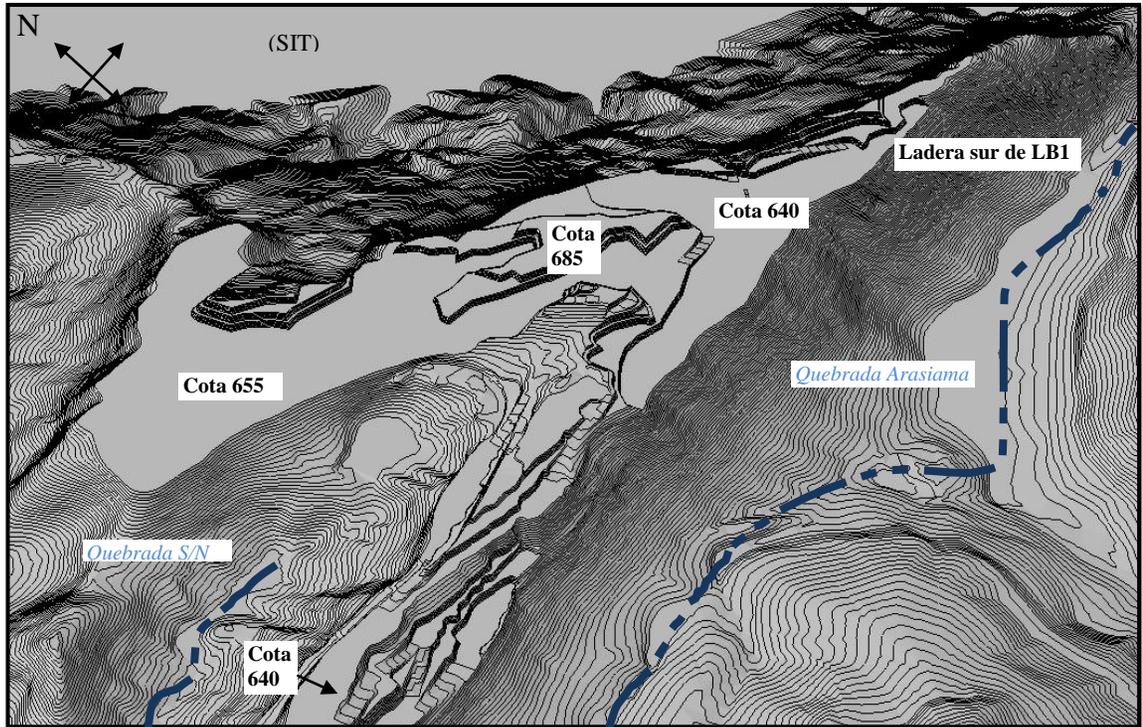


Figura 5.49 Mina Los Barrancos - año 2016.

La figura 5.50 presenta la topografía modelada correspondiente al año 2021. En ésta se reconocen aquellas zonas de terrazas uniformes que comienzan a descender hasta la cota 610 y la 625, conservando los amplios espacios en la colina con vista hacia el lago de Guri. También se observa el desarrollo de la explotación más al este, alargando la longitud del corredor vehicular en la cresta con sentido W-E. Al norte de Los Barrancos II también se podría desarrollar un acceso cuya conexión con la carretera nacional es más directa por su cercanía. Se mantienen vigentes las consideraciones anteriores relativas a cuenca visual, clima más fresco que en Ciudad Piar, litologías económicas, aun por explotar, mayor estabilidad para fundaciones de infraestructura e idealmente control de sedimentos en minería a cielo abierto.

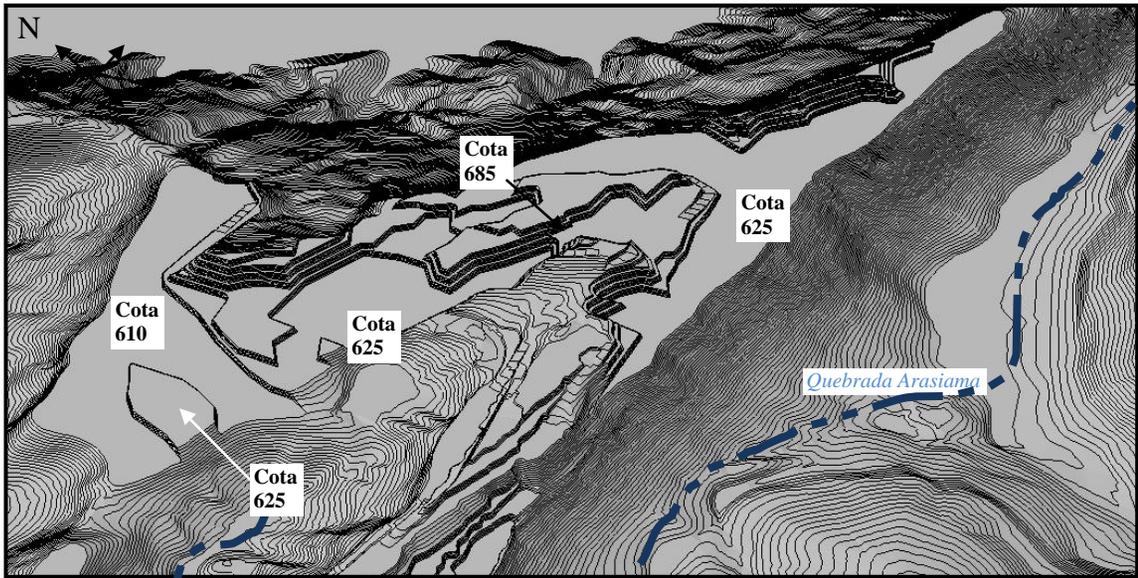


Figura 5.50 Mina Los Barrancos - año 2021.

El terraseo a lo largo de 36 años, es presentado en la figura 5.51. Las zonas minadas al noreste de Los Barrancos I continúan conservando el patrón de los años anteriores.

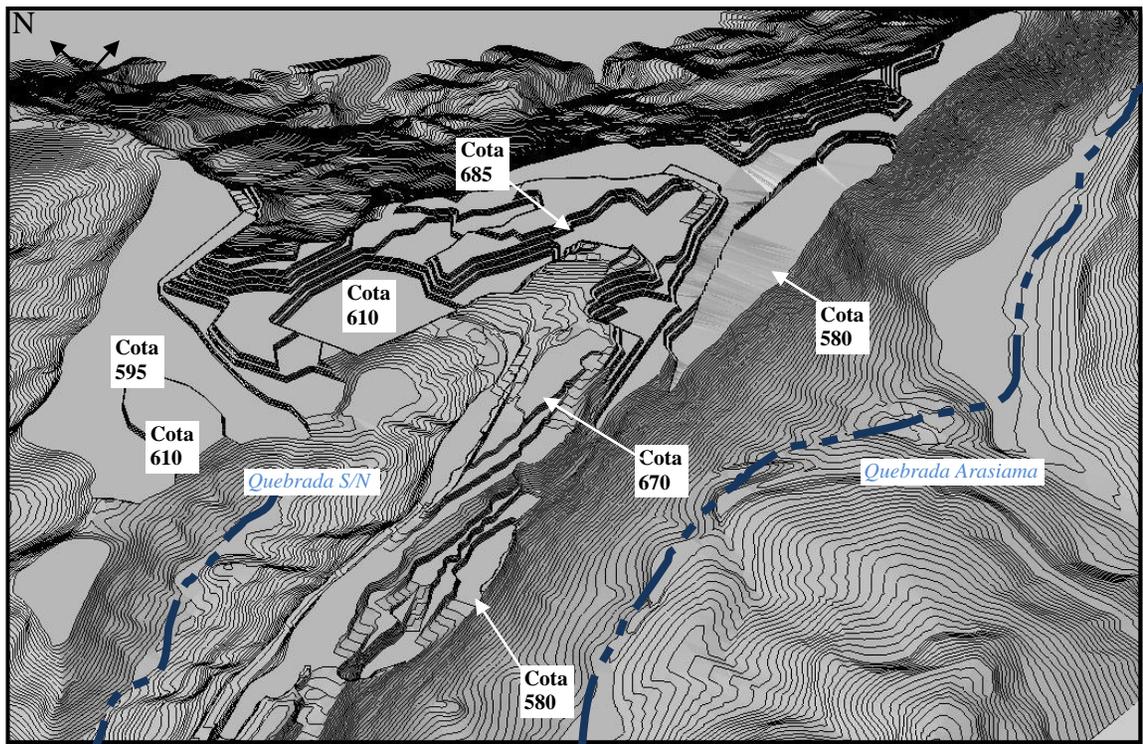


Figura 5.51 Mina Los Barrancos - año 2026.

La figura 5.52 presenta la topografía de la mina agotada, aproximadamente hacia el año 2041. En el caso de quebrada Arasiama se llegará con la explotación por debajo del nivel de la misma, sobre todo al este. En esta zona la menor cota será 355, muy por debajo del promedio del curso natural que es 460. Con esta planificación resulta inminente la pérdida de este cauce natural y posiblemente del cauce en la ladera norte.

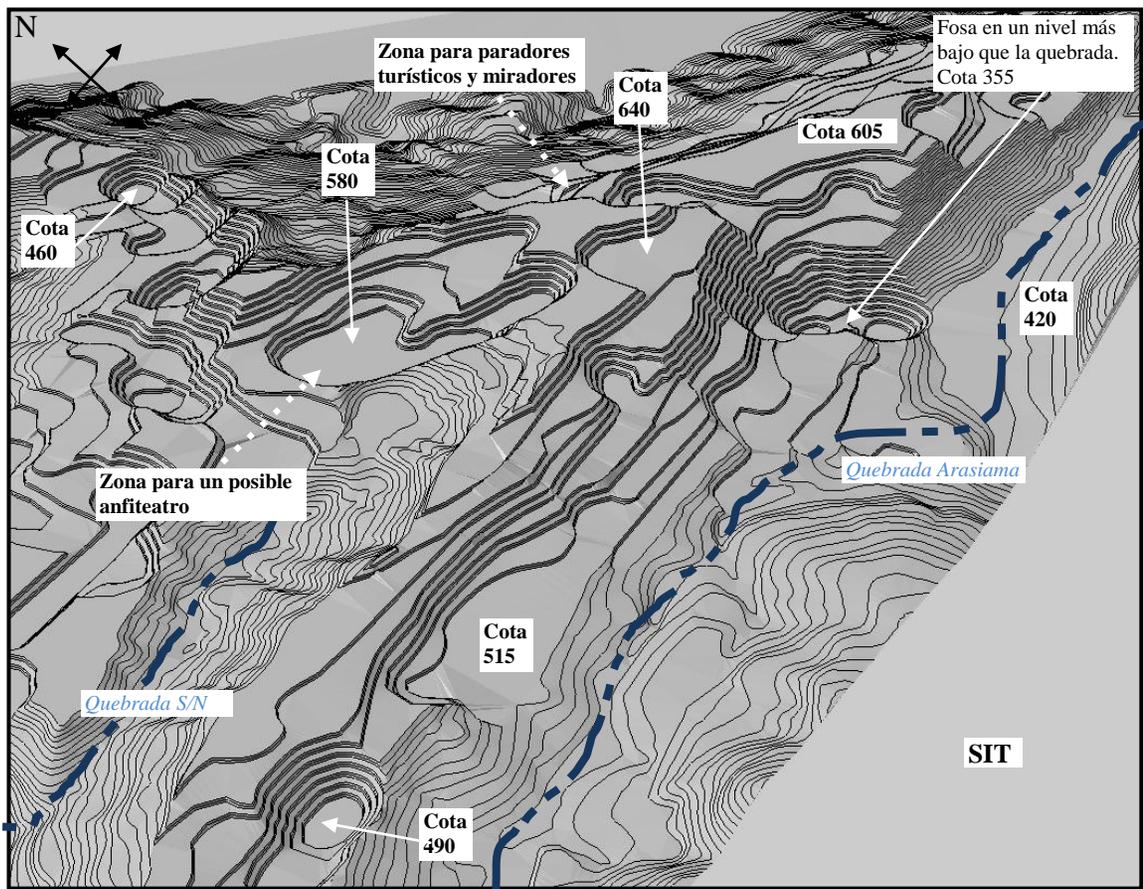


Figura 5.52 Mina Los Barrancos – Agotada

Con estas formas topográficas resultantes, en términos de nuevo uso del territorio se propone la creación de áreas de recreación; por ejemplo, en la zona indicada con la flecha, se puede construir un anfiteatro para la presentación de diversos tipos de espectáculos. En la zona norte de Los Barrancos II, se puede establecer un mirador

hacia el lago de la represa de Guri; De hecho en la actualidad se puede ver el lago, cuando las condiciones climáticas lo permiten.

### **Mina Las Pailas (LP)**

La mina LP tiene la característica especial de ser, de acuerdo con las estimaciones realizadas en la primera etapa de esta investigación, la primera en agotarse en el año 2023, entonces sólo faltan 13 años para este suceso. Por estas razones y teniendo en consideración que no se tiene experiencia en planificar el cierre de las minas del CFSI, CVG-FMO debe poner especial interés en definir, mediante investigaciones detalladas, el nuevo uso que tendrá este territorio para poder definir los objetivos, actividades de cierre y convertirlo en un espacio aprovechable para las comunidades y utilizar la experiencia aprendida para planificar los cierres subsiguientes de los otros cerros.

LP es el yacimiento central y más pequeño del cuadrilátero, CFSI; en éste la topografía original tenía una cota de 705 (ver figura 5.53). Como se presentó en la descripción de los cerros del capítulo 2, esta morfología corresponde con una delina o cavidad vertical de disolución de sílice. En este cerro se encuentran aguas termales cuyo acceso es restringido por estar dentro de la concesión para uso minero.

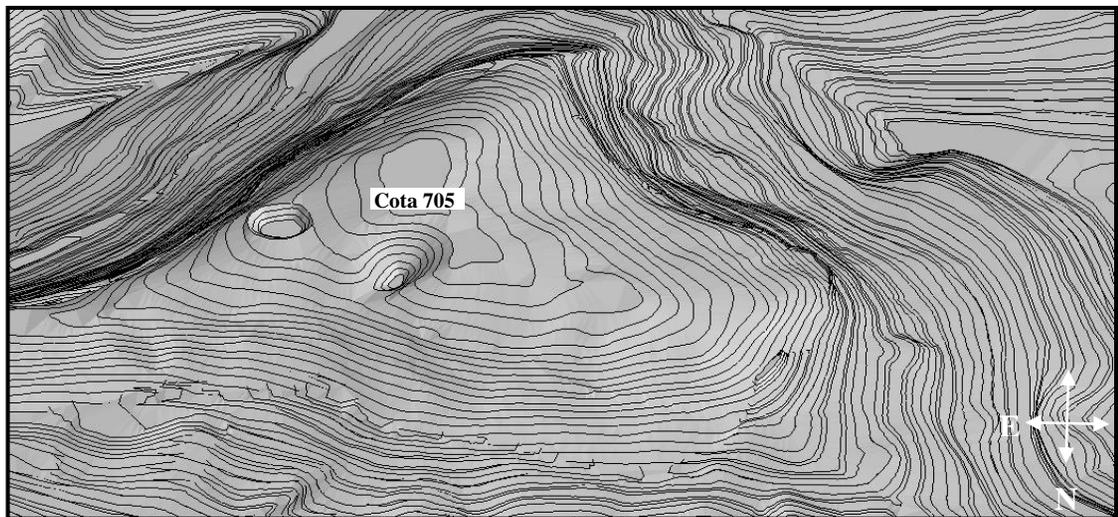


Figura 5.53 Topografía original de la mina Las Pailas.

El modelo generado para el año 2006 permite observar el cambio que las operaciones mineras han provocado en la topografía del cerro. La ejecución del diseño geométrico, en este caso, ha recontorneado la delina por el perímetro de la ladera oeste y con otro frente de arranque en el sector central; hasta la cota 580 se presentan formas irregulares y han ido quedando pináculos remanentes o topos de material. El acceso a la mina se realiza mediante una rampa que se inicia en la planta de trituración, PTLB y la flecha punteada, en la figura 5.54, presenta el sentido E-W para entrar al área.

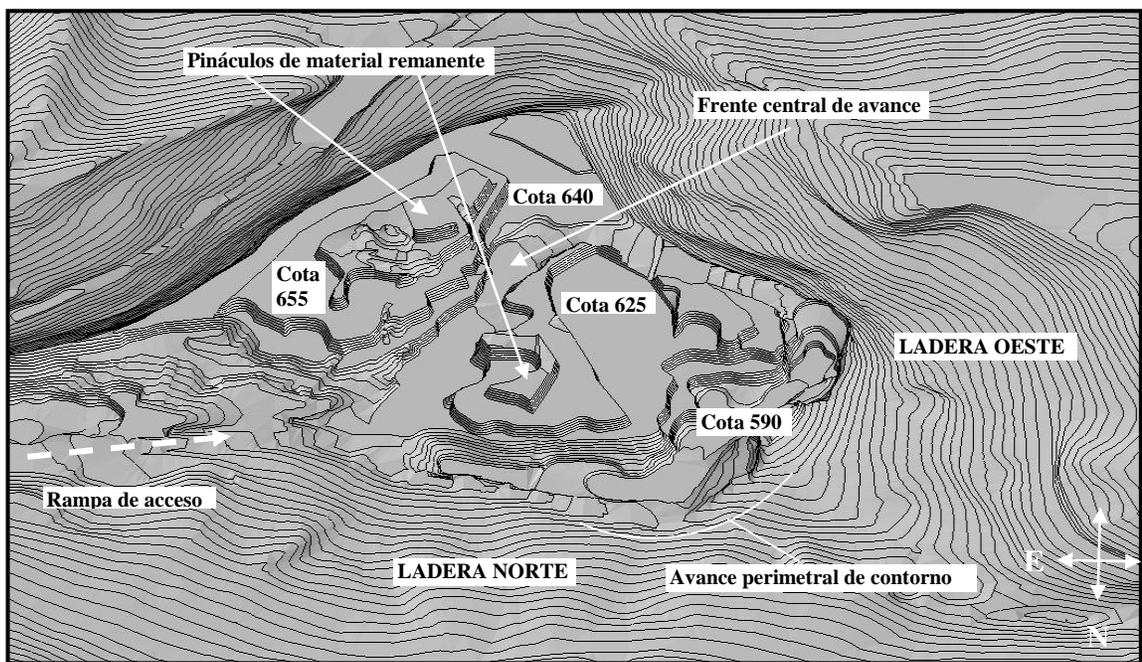


Figura 5.54 Mina Las Pailas - año 2006.

De acuerdo con el modelo del año 2011, se observan notables cambios, los cuales van desde la remoción de material remanente hacia el interior de la delina (ver figura 5.55), la generación de terrazas, cuyas cotas descienden en sentido hacia el oeste, siendo la de menor elevación la 580. Es decir, que la mayor declividad se desarrollará en la ladera oeste con tendencias a continuar generando movimientos de masa (como los mostrados en la sección 5.2.1, con relación a los taludes, y de arrastre partículas, tal vez en menor proporción, relativo a los otros cerros explotados).

La profundización de la explotación en la ladera oeste va creando la fosa final de explotación mineral como lo muestran modelos subsiguientes, en figuras 5.56 y 5.57.

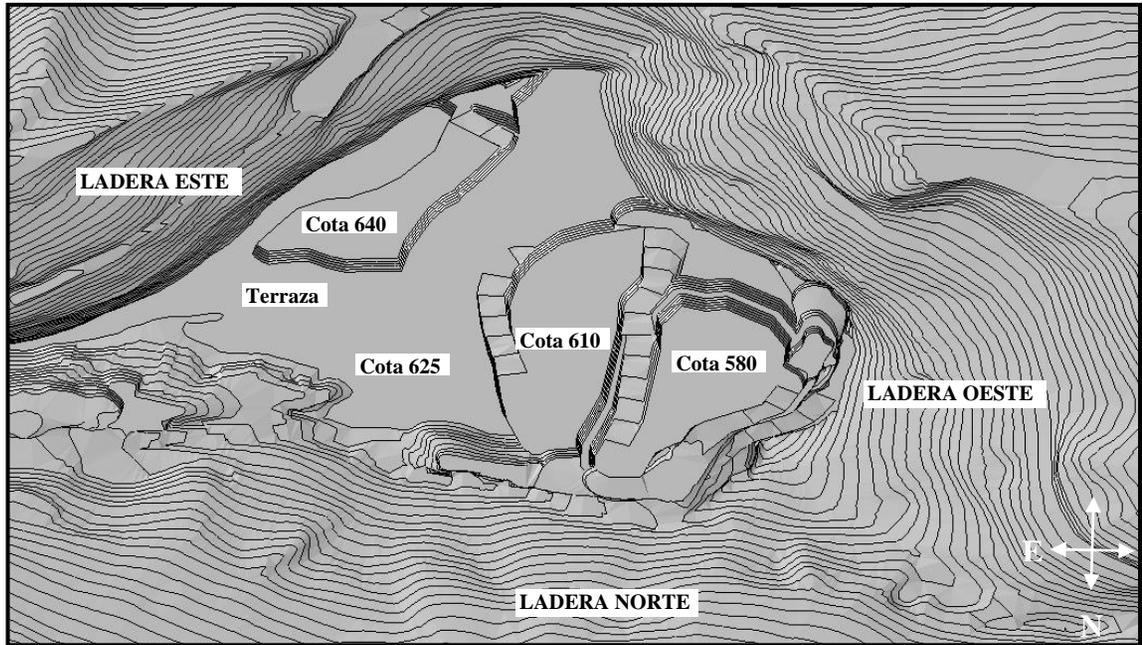


Figura 5.55 Mina Las Pailas - año 2011.

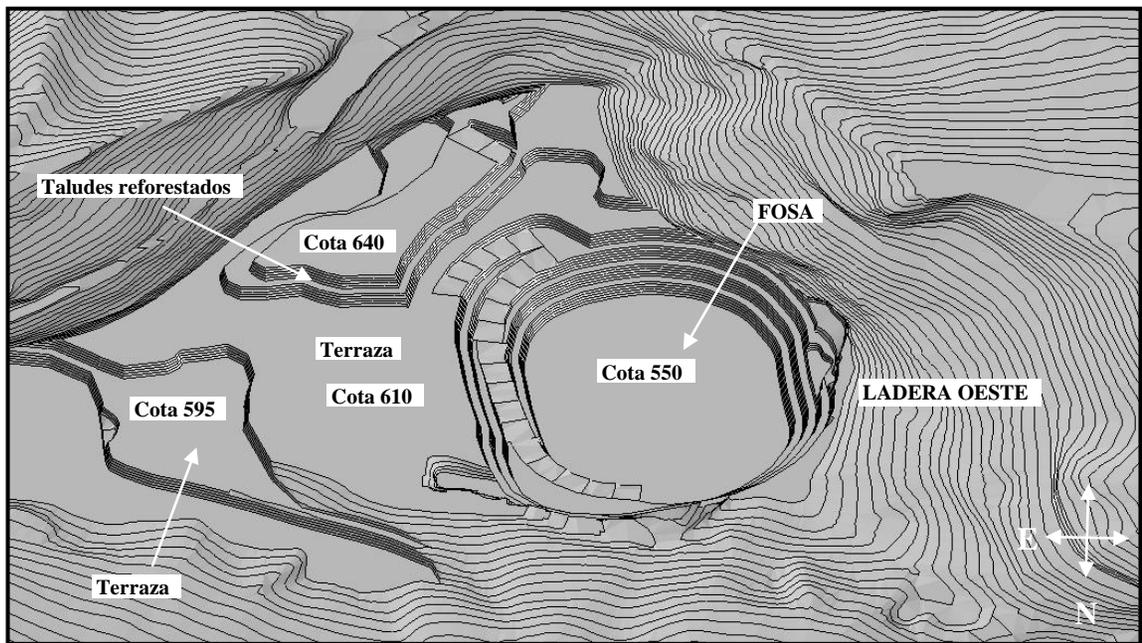


Figura 5.56 Mina Las Pailas - año 2016.

Como era de esperarse por la génesis del yacimiento, la forma resultante del uso minero es la fosa, con cotas: 610, en el borde superior y 550, en el fondo de la misma.

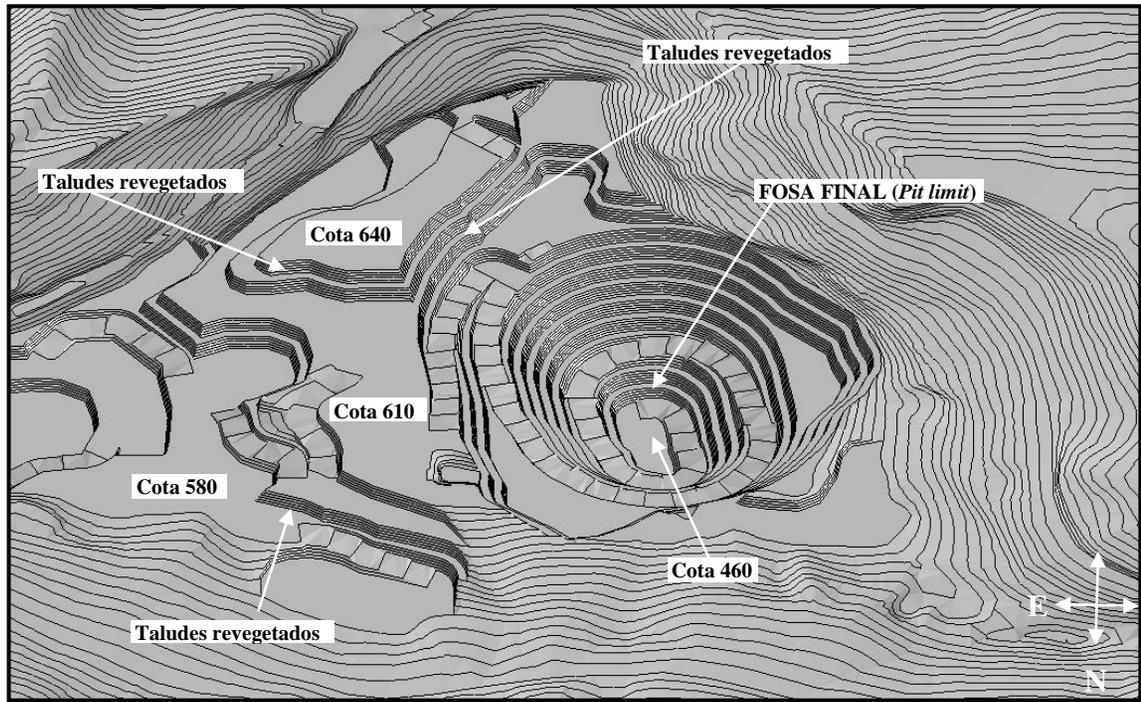


Figura 5.57 Mina Las Pailas - año 2020 –Agotado.

A partir del año 2016 las zonas más altas con cota 640 pudieran ser revegetadas, porque ya han sido agotadas, independientemente del nuevo uso que se le planifique al área minada, caracterizada fundamentalmente por una fosa.

Según el modelo LP estará agotada en el año 2020 y la cota inferior será 460, para un desnivel de 150 metros (ver figura 5.57). En términos de nuevo uso del territorio para esta mina podría proponerse la planificación de de nuevo uso que puede dársele es zona de reservorio de agua, tal vez aprovechando el recurso geotermal natural del cerro LP.

Por último, pudiera ser planificado como un depósito de materiales y desechos sólidos, teniendo en cuenta que en la zona del CFSI existen otros yacimientos que para ese momento ya estarán en explotación y existirán expansiones de la empresa

siderúrgica, resolviendo los drenajes naturales, con la conducción adecuada de las aguas.

### **Mina San Joaquín (SJ)**

La mina SJ aun no ha comenzado a ser explotada, está proyectada para comenzar actividades extractivas en el año 2011. La topografía original presenta una cota máxima de 760, desde donde la declividad converge hacia el este y es radial hacia el oeste. La vista que se presenta en la figura 5.58 corresponde al sector suroeste del cerro.

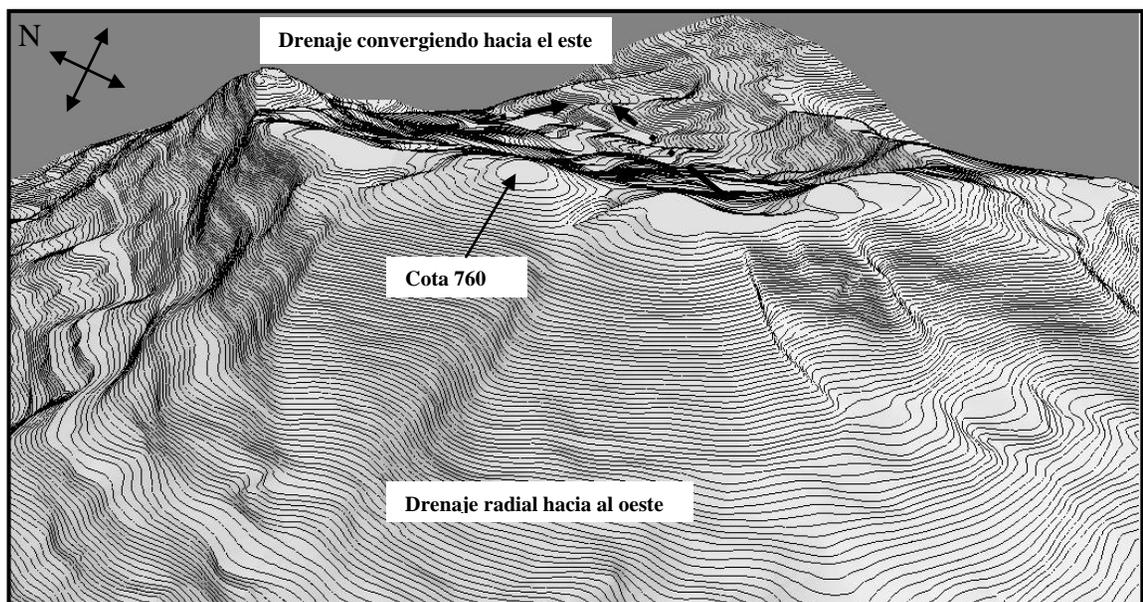


Figura 5.58 Topografía original de la mina San Joaquín.

En SJ, para el año 2011 se comienzan a presentar las terrazas y el banqueo; éste llevará el cerro hasta la cota 740 en la cresta. El acceso está planificado mediante una rampa (indicada por la flecha) que se inicia en el cerro LP (ver figura 5.59). Para la construcción de la misma se realizarán movimientos de tierra, corte y relleno. Se indica con flechas punteadas los lugares del corte del talud vial y del relleno para alcanzar las cotas de rasante de vía. Esta opción resultó de un estudio de alternativas de acceso a la mina, el cual incluyó la opción subterránea.

En las labores de preparación de SJ, el drenaje en la ladera este debería ser conducido hacia el noreste, (dirección natural de flujo, como indica la flecha). La rampa de acceso tendrá sus obras civiles, hidráulicas: cunetas, alcantarillados, torrenteras y tanquillas rompecargas o disipadores de energía. Deberá prestarse especial atención a los rellenos construidos para promover el drenaje rápido y eficiente de la masa de suelos.

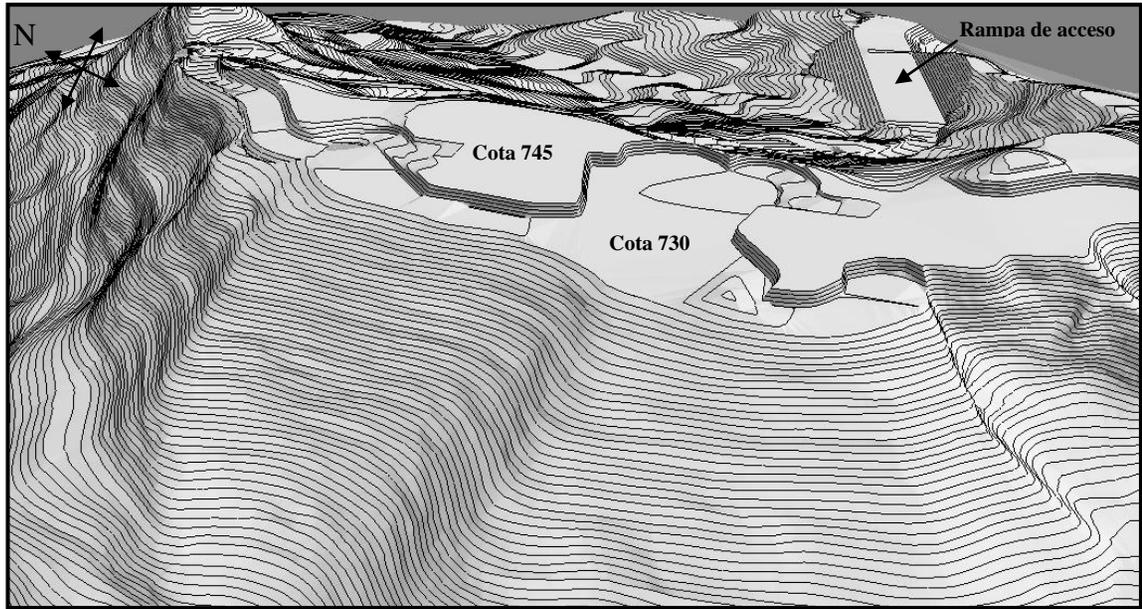


Figura 5.59 Mina San Joaquín - año 2011.

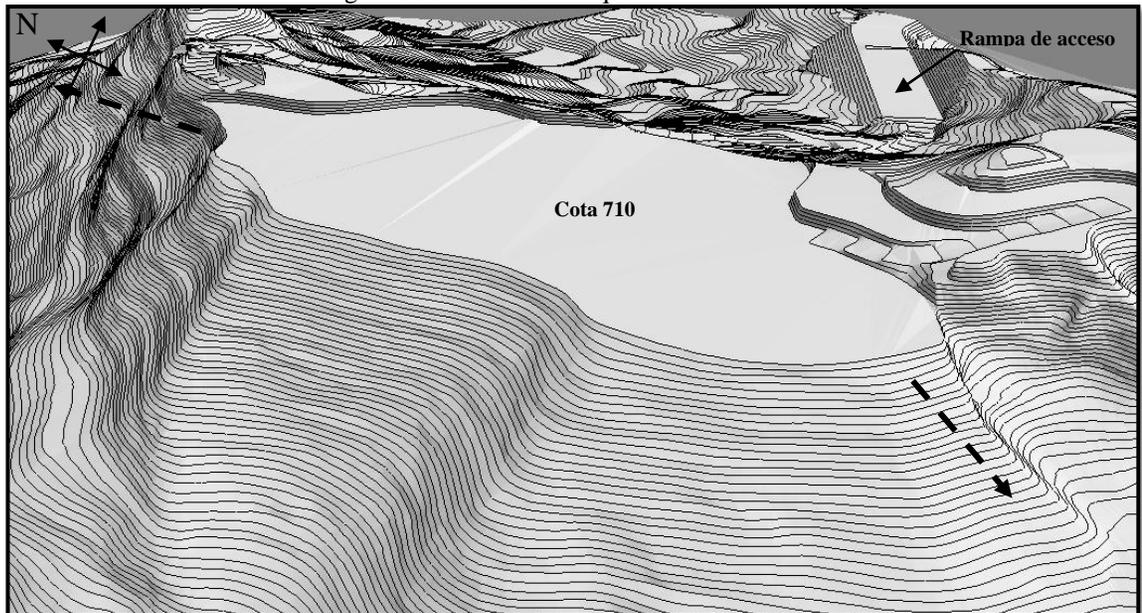


Figura 5.60 Mina San Joaquín - año 2016.

Para el año 2016 la topografía de SJ se presenta en la figura 5.60, con una plataforma amplia en la cota 710. La horizontalidad del corte del cerro lo asemeja a un tepuy (*plateau*), con la diferencia de que el declive no es vertical.

Los drenajes perimetrales resultarán imprescindibles para controlar el arrastre de sedimentos en suspensión ladera abajo, en la fachada hacia el oeste, por presentar un patrón radial. Para ello, es necesario manejar las aguas pluviales con pendientes desde el centro hacia los extremos N y S como indican las flechas punteadas. El drenaje vertical sería por torrenteras en los extremos y converger de nuevo hacia el centro al pie de la ladera oeste, para extraer con un canal principal que se aleja del cerro en dirección a la quebrada Mereicito, al oeste, para descargar al río Tocoma, tributario del río Claro hacia el lago Guri, en el norte.

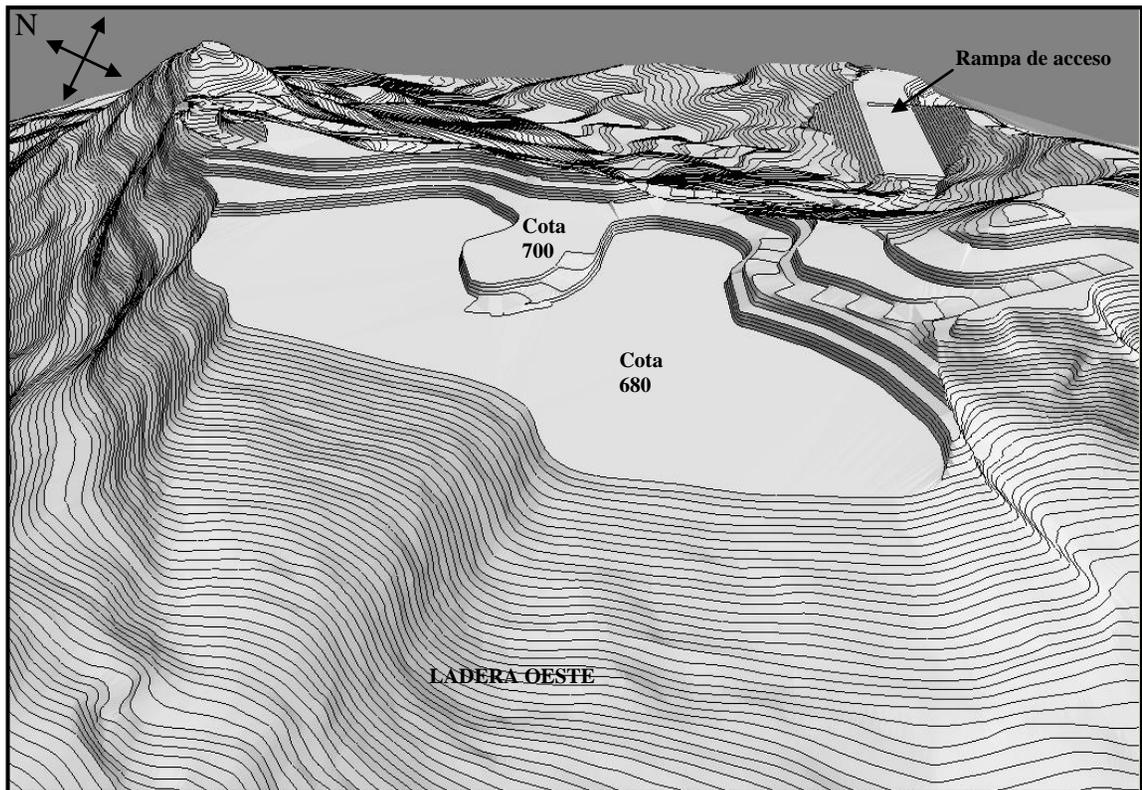


Figura 5.61 Mina San Joaquín - año 2021.

En el año 2021 se comienzan a desarrollar terrazas descendentes en la vertiente oeste del cerro, y se observa el sentido de la explotación hacia el oeste, a una cota de 680. (ver figura 5.61). Sera necesario atender con prioridad la ladera oeste y revisar si el sistema de drenaje planificado resulta eficiente, para evitar la entrada de sedimentos a la quebrada Mereicito y no repetir la situación de la quebrada Arasiama.

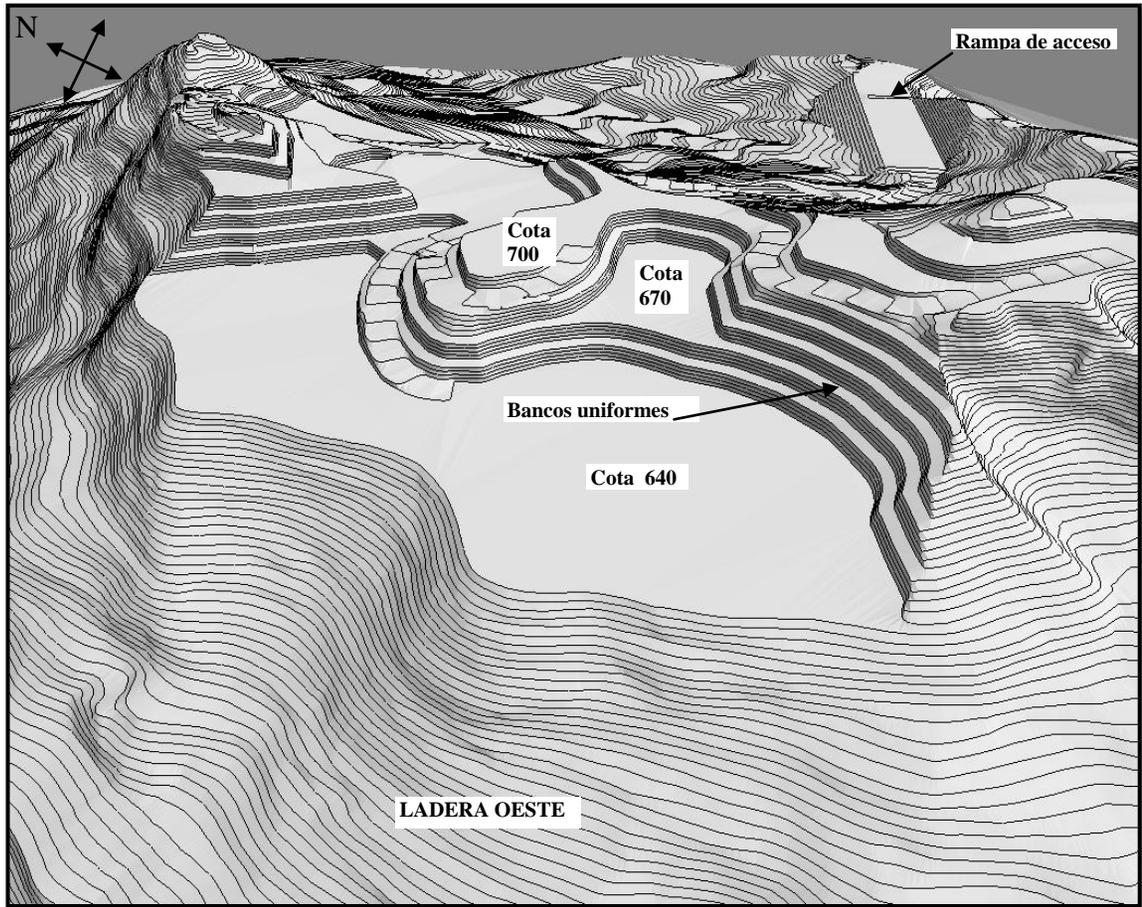


Figura 5.62 Mina San Joaquín - año 2026.

La topografía de la mina San Joaquín en el año 2026 (ver figura 5.62) continua descendiendo esta vez hasta la cota 640, se observa de la figura que existen bancos uniformes y se mantiene las consideraciones anteriores en relación al manejo de agua de mina y al control de sedimentos en minería a cielo abierto. Aunque la declividad

resulta más alta la litología del modelo geológico resulta más resistente a la erosión por ser cuarcitas duras, principalmente.

En la figura 5.63 se muestra la forma del *pit final* de explotación; en esta fosa la cota menor resulta 490 y la superior 650. La diferencia de altitud entre la topografía original y la minada es de 250m. Se observa que la ladera suroeste también será desestabilizada por las actividades mineras.

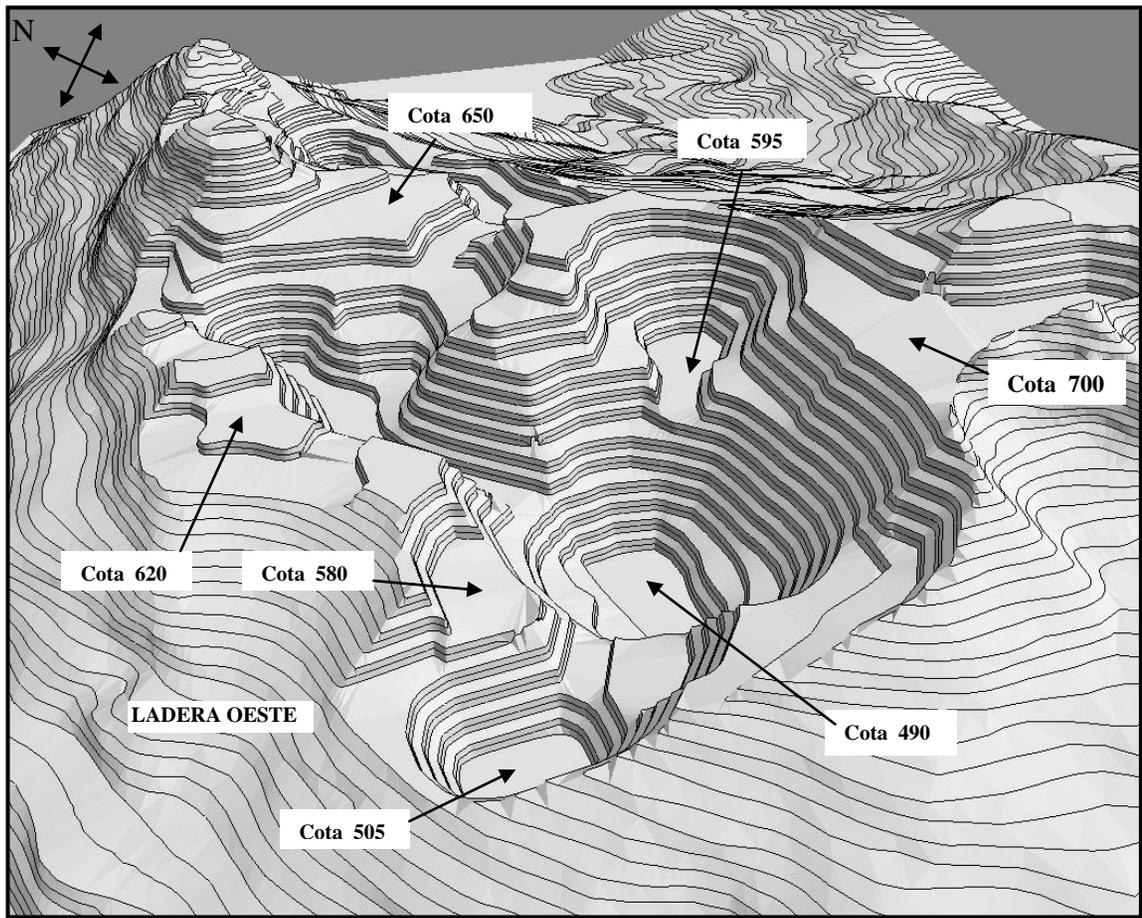


Figura 5.63 Mina San Joaquín - Agotada.

Considerando un nuevo uso educativo para este territorio se podría proponer la creación de un museo educativo minero en el que se expongan maquinarias ya en desuso y se imparta la teoría y práctica de minería a cielo abierto, que tanta falta hace a las universidades. Teniendo en cuenta que CVG-FMO tiene la posibilidad de

explotar otros yacimientos de mineral de hierro y la formación del recurso humano siempre es y será necesaria para estos y otros proyectos mineros.

### **Comentarios sobre la gestión ambiental de CVG-FMO**

La revisión del plan de gestión ambiental permitió conocer que CVG-FMO ha conceptualizado e implementado algunas medidas para controlar las aguas de escorrentía en la zona del CFSI para controlar el aporte de sedimentos a los cauces naturales, haciendo diques. Y prevé el re-contorneo y revegetación auto-sostenible de áreas descubiertas o denudadas, para prevenir la erosión y el aporte de sedimentos a las quebradas Arasiana, La Puertica y Merecito. Esta medida es fundamental para prevenir la producción de sedimentos.

Por otra parte hay que tener en cuenta que desde los inicios de las operaciones mineras no se presentaron planes de “rehabilitación” que plantearan medidas de control para las etapas de cierre y post-operación. A la fecha la operadora posee un instrumento llamado cronograma de adecuación ambiental.

Las operaciones mineras no han terminado en la mayoría de los frentes y no se conocen, estrategias de cierre, hecho que dificulta la selección de las medidas específicas que serán propuestas para manejo de los drenajes superficiales y su operación después del cierre. No se cuenta con planes de rehabilitación eficientes, por lo que se hace necesario incorporar algunas experiencias de minas de similares características que sirvan de base para ir elaborando, los planes de cierre.

El control de todas las posibles fuentes puntuales de producción de sedimentos y la re-adecuación del patrón de drenaje en las áreas intervenidas requiere de planeamiento detallado, documentado y actualizado con las características específicas de cada subcuenca intervenida.

Los datos disponibles de línea base pre-minería, son nulos. Lo anterior dificulta la comparación de valores de calidad de efluentes con datos de calidad de línea base pre-minería. Existen metodologías aceptadas por la comunidad científica para adquirir datos de línea base pre-operación, a partir de datos de zonas con características geológicas (geoquímicas) similares a las intervenidas pero que no hayan sido afectadas por actividades mineras.

El funcionamiento de las estructuras de control de sedimentos a largo plazo, requiere criterios de diseño que garanticen la continuidad de su operación y sin necesidad de mantenimientos rutinarios.

## ***CAPÍTULO VI. PROPUESTA DE PLAN DE CIERRE DE MINA***

La premisa principal de este plan es que sea recuperada la zona alterada de forma inmediata y simultáneamente con la actividad minera, con el objetivo de acortar el tiempo en que se realiza el daño y la remediación.

Por ser diseñado con rangos de tiempos relativamente grandes, en lo que se refiere a la duración de las operaciones mineras para ser llevado a cabo a largo plazo, estará condicionado a modificaciones que son producto del ajuste y de la adecuación a las tecnologías emergentes y se limitara a proponer directrices generales que podrán ser afinadas con el desarrollo de estudios específicos cada cerro en particular.

### ***Plan de Cierre de Mina propuesto para el CFSI***

De acuerdo con los cambios topográficos determinados en el capítulo anterior se propuso principalmente para todos los cerros del CFSI un nuevo uso turístico – educativo y recreacional, aprovechando las potencialidades de crecimiento demográfico e industrial que proyecta la zona.

Este plan de cierre progresivo contempla los siguientes objetivos:

- A. Garantizar la estabilidad de los taludes del CFSI a mediano y largo plazo.
- B. Controlar el proceso erosión – sedimentación
- C. Establecer medidas mínimas para revegetación de áreas afectadas
- D. Vincular a la comunidad en el proceso de cierre del CFSI

Las actividades mínimas para lograr estos objetivos son:

- 1) La ejecución de medidas de prevención y control: para controlar tanto la cantidad y calidad del drenaje superficial de las áreas minadas con el objetivo de prevenir la afectación en causas naturales en las minas y en su área de influencia. También para garantizar la estabilidad a largo plazo de los taludes de frentes de trabajo agotados y los taludes de las escombreras. Estas deben

formar parte del plan de explotación con miras a planificación ambiental de minas, siendo aplicadas: antes (en el caso de San Joaquín), durante la operación (de San Isidro y Los Barrancos), en el cierre próximo de Las Pailas y en la fase post- minería.

- 2) Medidas de corrección y mitigación: se ha contemplado medidas de terraceo y revegetación, usando medio auto sostenible, y la construcción de canales, lagunas de sedimentación, y diques temporales y/o permanentes para controlar la descarga de sedimentos en cuerpos acuáticos superficiales. Se espera que una vez adelantada la etapa de cierre solamente queden como permanentes y en operación muy pocas estructuras para control de la sedimentación.
- 3) Monitoreo y seguimiento: Para monitorear la efectividad de las medidas propuestas, se propone el diseño de un plan de monitoreo de calidad de aguas, de calidad de suelos y de estabilidad de taludes con periodicidad anual. Con inspecciones habituales, para documentar la eficiencia e inconformidades que permitan visualizar la necesidad de implementar o no medidas adicionales.

Una actividad común para todos los procesos de cierre del CFSI, es la obtención de la línea base ambiental pre minería, para poseer valores de comparación en cuanto a la calidad del entorno natural antes de la afectación. Se quiere como mínimo que se mantengan las características actuales. En CVG-FMO por no existir estos criterios y ceñirse a un cronograma de adecuación ambiental se propone la obtención de valores pre minería medidos en el Cerro San Joaquín, que aún no ha comenzado su explotación.

El cierre de una mina es un proceso particular y específico, cada mina tiene características diferentes; en este sentido las medidas de cierre particulares para cada uno cerros se presentan a continuación:

**Plan de cierre de mina propuesto para el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, CFSI. CVG-FMO, C.A. (Blanco, 2007).**

<p style="text-align: center;">MINA →</p> <p style="text-align: center;">ACTIVIDAD</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	Cerro Las Pailas (LP)		Cerro San Isidro (SI)		Cerro Los Barrancos (LB)		Cerro San Joaquín (SJ)	
	A mediano plazo:	A largo plazo:	A mediano plazo:	A largo plazo:	A mediano plazo:	A largo plazo:	A mediano plazo:	A largo plazo:
<b>Estabilidad de taludes</b>	<p>Actualizar el diseño geométrico de los taludes de trabajo.</p> <p>Revisar el diseño de fosa final de excavación.</p>	<p>Algunos taludes deben ser revegetados y otros reperfilados.</p>	<p>Revisar el diseño geométrico y correcta ejecución del mismo, con estudios geomecánicos en diferentes litologías.</p> <p>Controlar los movimientos de material fino, en la ladera sur, a los fines de sanear los problemas de bancos múltiples y aprovechar las</p>	<p>Ejecutar correctamente el diseño geométrico acorde con la litología aflorante, hasta llegar a la cuarcita dura, que será la litología remanente en el cierre.</p> <p>Excavar los sedimentos acumulados en la fosa.</p> <p>Acondicionar los taludes de la fosa final</p>	<p>Revisar el diseño geométrico con miras a evitar la inestabilidad de los taludes de trabajo.</p>	<p>Por la transición de las litologías hasta llegar a la cuarcita dura, es necesario revegetar algunos taludes y colocar canales en superficie para control de escorrentía.</p>	<p>En vista de que no ha comenzado a ser explotado y según la planificación el diseño geométrico a utilizar es el mismo que para los otros cerros, Se tendrá que revisar el diseño geométrico de los taludes.</p>	<p>Se ejecutará y verificará la realización del diseño geométrico.</p> <p>Así mismo se tomarán medidas para estabilizar los taludes, si fuese necesario.</p>

			reservas de finos negros que aún posee este yacimiento	de excavación para el nuevo uso, bien sea usando geosintéticos u otro material que sea impermeable.				
<b>Control del proceso erosión – sedimentación</b>	Revisar el sistema de manejo de agua de mina. En la ladera norte, donde las aguas de escorrentía drenan a un curso natural superficial; es necesario colocar barreras de sedimentos o vivas.	Rediseñar el sistema de drenaje de acuerdo con el nuevo uso del territorio y atender la entrada de sedimentos a los cursos naturales con estrategias que no requieran supervisiones periódicas.	Controlar la entrada de sedimentos a la quebrada La Puertita, al sur y a Mereicito, al oeste, mediante la colocación de barreras vivas en el pie de las laderas y con diques de retención de sedimentos.	Colocar al pie de la ladera oeste del cerro, estructuras de geotextiles o geomembranas orgánicas, barreras de sedimentos o filtros granulares.	Revisar de manera urgente el sistema de drenaje de la mina, para evitar la pérdida de la quebrada Arasiama, por colmatación de sedimentos.	Con el sentido descendente de la explotación en las laderas norte y sur de LB1, resulta complicado atender efectivamente la entrada de sedimentos a los cauces naturales.	Colocar barreras vivas al pie de la ladera oeste del cerro, en las terrazas colocar difusores laminares y conducir el drenaje de los extremos hacia el centro de la ladera, para descargar finalmente en la quebrada Mereicito.	Atender el posible aporte de sedimentos a la quebrada Mereicito, mediante un nuevo sistema de drenaje que proteja con prioridad la quebrada, con diques en pie de ladera, estructuras rompe carga y barreras vivas.
<b>Revegetación</b>	Igualmente realizar estudios de revegetación	Revegetar todos los taludes que se encuentran	Realizar estudios de revegetación en la ladera	Revegetar la ladera oeste del cerro.	Disponer adecuadamente el suelo en las zonas de	Revegetar los taludes cercanos a la PTLB	Disponer de manera adecuada la capa de suelo	Revegetar los taludes superiores a medida que

	en los taludes por encima de la cota 610msnm.	fuera del área de la fosa principal, con independencia del nuevo uso	oeste, para identificar las formas y especies más convenientes.		LBII, que no han sido explotadas.		superficial, para facilitar las labores de revegetación.	se profundiza en la explotación.
<b>Vinculación de la comunidad en el proceso de toma de decisiones de cierre de mina</b>	Consultar lo antes posible a la comunidad sobre el cese del uso minero, a los fines de decidir el nuevo uso más adecuado para todas las partes involucradas.	Implementar programas de rehabilitación laboral.	Iniciar la consulta a la comunidad sobre el cambio de uso del territorio.	Implementar programas de rehabilitación laboral.	Iniciar la consulta a la comunidad sobre el cambio de uso del territorio.	Implementar programas de rehabilitación laboral.	Iniciar la consulta a la comunidad sobre el cambio de uso del territorio.	Implementar programas de rehabilitación laboral.
<b>Nuevo uso propuesto</b>	Reservorio de agua dulce o depósito de materiales industriales.	Lago para actividades recreativas, práctica de deportes acuáticos y pesca.		Corredor turístico, con miradores y anfiteatros.		Museo educativo minero y Aula minera.		
<b>Cierre estimado por agotamiento de reservas recuperables</b>	Año 2023	Año 2031		Año 2041		Año 2045		

## ***CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES***

### ***I. CONCLUSIONES.***

#### **Generales:**

- ♣ La República Bolivariana de Venezuela no posee legislación específica sobre cierre de mina, lo que ocasiona la completa ausencia de criterios (regulatorios) operativos mineros para guiar las operaciones mineras, con fines de rehabilitación ambiental para nuevo uso del territorio. Los criterios son distintos a las regulaciones; los primeros no son vinculantes.
  
- ♣ Desde la visión de cierre de mina, la gestión ambiental debe estar articulada y direccionada con el aprovechamiento mineral, razón por la cual el plan de explotación mineral debe estar integrado al plan de cierre de mina, debido a que el territorio permanece en el tiempo y el uso cambia, de minero a algún otro posible.
  
- ♣ La gerencia de CVG-FMO tiene la necesidad de tomar decisiones acerca de verdaderas estrategias con miras al cierre de las minas del CFSI, con carácter prioritario, desde los actuales momentos. Esto es indispensable para poder planificar y diseñar el cierre de los cerros del cuadrilátero a detalle, como lo establece la legislación ambiental vigente, específicamente el decreto 1.257.
  
- ♣ CVG-FMO no posee estudio de impacto ambiental (EIA) del cuadrilátero, en consecuencia no tiene información de línea base pre minería, lo cual dificulta enormemente los procesos de planificación de estrategias ambientales, al no tener valores que sirvan de meta o para comparación de la calidad de atributos físicos.

- ♣ Dentro de una planificación del territorio y del ambiente, a largo plazo, se requiere que la planificación de uso minero, de corto plazo (plan de explotación mineral), produzca las transformaciones y cree las condiciones que permitan el uso posterior.
- ♣ Mediante el análisis del plan a largo plazo 2006-2026 se estimó el orden de agotamiento de los yacimientos: Las Pailas en el año 2020; San Isidro en el 2031; Los Barrancos en el 2041 y San Joaquín en el año 2045.

### **En cuanto al modelaje de los yacimientos**

- ♣ En la mina San Isidro la fosa final (*pit limit*) tendrá una cota mínima de 400msnm, obteniéndose una diferencia con respecto a la topografía original de 305m. Se propone como nuevo uso para este territorio, una zona recreativa, donde la fosa final se inunde y se cree un lago, en el cual se puedan practicar deportes acuáticos y criar peces para el consumo y comercio por las comunidades.
- ♣ En la mina Los Barrancos la fila larga y estrecha será terraceada hasta la cota 355m, muy por debajo del nivel promedio de la quebrada Arasiama a 460m. Para este territorio también se propone la creación de zonas de recreación, como un anfiteatro, también se pueden establecer miradores para observar el lago de Guri.
- ♣ En la mina Las Pailas, la diferencia de cota entre la topografía original y la cota en la fosa final será de 245m. Se podría planificar para este espacio un reservorio de agua aprovechando el recurso geotermal de esta área. O puede ser utilizado como depósito de materiales y desechos sólidos, teniendo en cuenta la expansión de la empresa siderúrgica.
- ♣ En la mina San Joaquín, la diferencia de altitud entre la topografía original y la minada es de 250m. La mina agotada podría convertirse en museo

educativo minero, donde se impartan las clases prácticas que tanta falta hacen a los estudiantes en las universidades.

- ♣ De acuerdo con la modelización de la secuencia de excavación, los cambios topográficos de las diferentes minas del CFSI, se evidenció que todas las laderas serán desestabilizadas por el sentido descendente de la explotación. De atender no debidamente el aportando sedimentos a los cauces naturales y causando soterramiento por producción excesiva de sedimentos, como en el caso de la quebrada Arasiama.

### **En cuanto a la estabilidad de los taludes**

- ♣ En la ladera sur de la mina San Isidro se ejecuta un diseño geométrico que genera doble y triple banqueo, aumentando la altura de los taludes y consecuentemente el riesgo de inestabilidad de los mismos.
- ♣ Se observó el movimiento de masas en las minas de CFSI, influenciados por la litología aflorante en los frentes de trabajo.
- ♣ En la mina San Isidro se evidenciaron movimientos de masas gravitacionales de material fino (finos negros), probablemente el ángulo de fricción de estos materiales ha sido superado por el ángulo de trabajo, produciéndose el descenso de estos materiales.
- ♣ Así mismo en la mina Las Pailas la verticalidad de los taludes es evidente pudiendo comprometer la estabilidad y la seguridad de las labores operativas.

### **En cuanto a la erosión de los suelos**

- ♣ La atención a los procesos de erosión – sedimentación son prioritarias en todo el CFSI, con el fin de garantizar la estabilidad de los taludes, evitar la colmatación de los cauces naturales superficiales y facilitar la revegetación de zonas afectadas por la actividad minera.

- ♣ Los ensayos granulométricos en húmedo resultan más convenientes cuando se realiza la planificación ambiental de protección de cuencas, debido a que permiten obtener la cantidad real de finos en muestras de suelos.
- ♣ Los ensayos granulométricos permitieron reconocer el tipo de suelo y clasificarlo como arena fina limosa y limo arenoso (SM-ML), con poca presencia de arcilla en los suelos muestreados.
- ♣ Los ensayos para la determinación del peso específico dieron resultados ser muy altos: 4,38 en la mina LB; 4,17 en la mina LP; mientras que en las muestras de SI resultaron ser más bajos 2,56. Teniendo en cuenta que los suelos muestreados son transportados se infiere la posibilidad de pérdida significativa de mena por aguas de escorrentía.
- ♣ El método de azul de metileno reportó índices de nocividad muy bajos 0,80 sugiriendo que los suelos son poco susceptibles de ser erosionados, por lo cual la fuerte erosión en el CFSI, puede estar influenciada por los suelos arenosos, la pronunciada declividad, la geometría de los bancos y tal vez las cargas dinámicas inducidas por las voladuras.
- ♣ La serie de factores climatológicos, geomorfológicos, litológicos y operativos mineros, en CFSI potencian el proceso de erosión: la erosividad de la lluvia, la litología altamente deleznable y friccionante, la elevada pendiente natural, un diseño geométrico único, inadecuado en distintas litologías, elevado peso específico de las partículas, las vibraciones producidas por las voladuras, además de la sismicidad del área por el embalse de Guri.
- ♣ Se estimó la velocidad de flujo necesaria para iniciar el transporte de partículas en 1,5 cm/seg y con velocidades superiores a 15 cm/seg se

erosionan estos suelos. Sin embargo, por el elevado peso específico, estas velocidades pueden ser mayores.

### **En cuanto a la revegetación.**

- ♣ Los modelos generados permitieron observar las áreas que deberían ser revegetadas: en la mina San Isidro, en particular la ladera oeste, sin importar el nuevo uso que pudiera tener. Así mismo en la mina Los Barrancos todos los taludes cercanos a PTLB deben ser revegetados. En la mina Las Pailas todos los taludes externos de la fosa, independientemente del uso propuesto, deben ser revegetados. Y en la mina San Joaquín, debe hacerse simultáneamente con el descenso de la explotación, teniendo en cuenta que se propone usarlo como un museo temático minero.

### **En cuanto a la rehabilitación laboral de la comunidad**

- ♣ En Ciudad Piar las responsabilidades de mantenimiento, que corresponden al gobierno local, han sido asumidas por CVG-FMO por tradición. Aquí se evidencia la estrecha dependencia que tiene la comunidad de la operadora minera.
- ♣ La consulta realizada, mediante encuesta a la comunidad en Ciudad Piar, reportó que al 60% de las opiniones recogidas corresponde a una preferencia de que el nuevo uso a planificar en el CFSI, fuese el de zonas de recreación con parques y otras instalaciones. Por otra parte, 60% de las personas encuestadas no conocían lo que es un plan de cierre de mina.
- ♣ Los habitantes de Ciudad Piar desean participar en la toma de decisiones de los proyectos que tienen que ver con el cierre para uso minero del CFSI.

## **II. RECOMENDACIONES.**

### **Generales:**

- ♣ Incorporar las estrategias del plan de cierre propuesto a los planes de explotación de corto, mediano y largo plazo, para ser ejecutadas con la gestión ambiental planificada por la operadora minera.
  
- ♣ En vista de la ausencia de línea base ambiental pre minería, se recomienda realizar la Evaluación Ambiental Específica o el Recaudo Específico a la mina San Joaquín, a los fines de obtener los valores base, aprovechando que este yacimiento no ha comenzado a ser explotado.
  
- ♣ Elaborar un protocolo de auditoría de cierre de mina, que permita identificar las necesidades específicas de rehabilitación ambiental a largo plazo.
  
- ♣ Diseñar e implementar un plan de muestreo anual de calidad de aguas en las quebradas y ríos afectados por la actividad minera, el cual pueda ser realizado bajo las mismas condiciones, de manera sistemática. Esto permitirá generar un registro histórico de datos de calidad de agua; con el objetivo de conocer si se encuentran bajo la norma ambiental de calidad.

### **En cuanto a la estabilidad de los taludes**

- ♣ Realizar estudios geomecánicos para evaluar la estabilidad de materiales que van quedando expuestos, en el mediano y largo plazo, a los fines de determinar el comportamiento geomecánico y perfeccionar el diseño geométrico del *pit* final de cada una de las minas.
  
- ♣ Implementar diseños geométricos en función de las distintas litologías que van quedando expuestas en el yacimiento.

- ♣ Realizar la recuperación ambiental para revegetación en los taludes o frente de trabajo en zonas agotadas de forma descendente, para ejecutarlo de manera simultánea con la explotación mineral. Mientras que para la recuperación de escombreras de forma ascendente; es decir recuperar primero la base y luego las capas superiores.

### **En cuanto a la erosión de los suelos**

- ♣ La clasificación física de suelos debe ser realizada con criterios distintos; en el caso del control de sedimentos en minería a cielo abierto, la granulometría en húmedo resulta conveniente para conocer la cantidad real de finos en los suelos muestreados.
- ♣ Realizar ensayos específicos que indiquen la erodabilidad de los suelos del CFSI, a fin de establecer las estrategias correctas para el control de sedimentos en minería a cielo abierto.
- ♣ Atender con prioridad la situación de entrada de sedimentos a la quebrada Arasiamá y a los cursos naturales que se encuentran al pie de las laderas de los cerros del CFSI, que serán afectados en el futuro cercano. Esto puede ser atendido mediante la utilización de materiales como barreras vivas con la gramínea tipo Vetiver, retentores de sedimentos, diques y lagunas de decantación.
- ♣ Actualizar y revisar con periodicidad el sistema de drenaje de las minas del CFSI, con el fin de controlar eficientemente la entrada de sedimentos a los cauces naturales y mantener la calidad de las aguas, dentro y fuera de las subcuencas.
- ♣ Potenciar su programa de control de erosión y sedimentación, mediante la caracterización con ensayos en las litologías aflorantes en los frentes de

trabajo, con el objetivo de la protección de las sub cuencas hídricas en estas minas.

- ♣ Realizar un estudio para determinar los materiales adecuados que puedan ser utilizados para la corrección de cárcavas y adecuar las prácticas de la gestión ambiental.

### **En cuanto a la revegetación.**

- ♣ Realizar estudios específicos con miras a revegetación de los taludes y estudiar las distintas prácticas para poblar con especies vegetales autóctonas del área. Es posible aprovechar la experiencia adelantada que existe con los taludes revegetados del cerro El Pao y el Cerro Bolívar.
- ♣ Aprovechar la experiencia de minas con características similares, como en el caso de la mina ferrífera Carajás, en el estado de Pará, de la República Federativa de Brasil, operada por la CVRD, que usa para la revegetación de sus taludes con la leguminosa *Caliandra macrocalys*, inoculada con una cepa cultivada de la bacteria fijadora de nitrógeno de la especie *Rhizobium*.

### **En cuanto a la rehabilitación laboral de la comunidad**

- ♣ Integrar a las comunidades organizadas de las poblaciones: Ciudad Piar, Tocomita y Santa Bárbara, en el proceso de planificación del cierre de las minas del CFSI, con el objetivo de involucrarlos en el proceso de toma de decisiones, porque ellos serán los principales afectados, de forma directa.
- ♣ Realizar un estudio sociocultural que evalúe directamente las consecuencias del cierre progresivo del CFSI, debido a que se ha puesto de manifiesto el deseo de que la experiencia negativa de la mina El Pao, no se repita.

## **REFERENCIAS.**

- ♣ ANDARA, Z (2005). *Diseño de un sistema de drenaje para controlar y minimizar la erosión y transporte de sedimentos en la vertiente sur de la mina Los Barrancos, Cuenca alta del río Arasiama, Estado Bolívar, Venezuela*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Experimental de Guayana. 175 pp
  
- ♣ AYALA, F y VADILLO F. (1995). *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
  
- ♣ CANTER, L (1998). *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto*. Mc Graw Hill. Madrid. España. 840 pp.
  
- ♣ CASTILLEJO, M. (1993). *Análisis Comparativo de los Métodos de Estabilidad de Taludes y su Control*. Trabajo de Ascenso Publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
  
- ♣ CORDOVA, M y R, ESCOBAR (2003). *Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales del Agotamiento o Clausura de minas de C.V.G. Ferrominera Orinoco C.A. Departamento de Planificación y Desarrollo de Mina*. Ciudad Piar. Estado Bolívar.
  
- ♣ CHACÓN, E. (1995). *Recuperación Ambiental en Minería*. Tomo 2. FUNDAUDO. C. V. G Ferrominera Orinoco. Ciudad Piar.

- ♣ CUMMINS, ARTHUR. (1973), *S.M.E mining handbook*. Editorial Chairman. New York - New York. pp. 9.3-9.8.
  
- ♣ CONTRERAS, F (2006), *Contaminación Ambiental con Mercurio en Áreas Afectadas por las Actividades Mineras, en la Cuenca del rio Cuyuní*. Universidad de Salamanca. España. Tesis Doctoral, pp 90.
  
- ♣ C.V.G TECMÍN C.A. (1991). *Informe de Avance NC-20-14 y NB-20-2 Clima, Geología, Geomorfología, Suelos, Vegetación*. Tomo I. Ed C.V.G. Técnica Minera. Ciudad Bolívar.
  
- ♣ BELL, F (1981). *Engineering Properties of Soils*. Third Edition. 332 pp.
  
- ♣ Equipo MMSD América del Sur. (s/a). *Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable en América*. Coeditado por: Centro de Investigación y Planificación del Medio Ambiente (CIPMA), Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (IPRC), Iniciativa de Investigación sobre Políticas Mineras (IIPM).
  
- ♣ GASPIERI, R. (1982). *Principios Básicos de erosión y Conservación de Suelos*. Suplemento técnico n° 28. Fundación para el Desarrollo de la Región Centro Occidental de Venezuela. Barquisimeto. 192 pp
  
- ♣ GILL, J. (2003). *Diagnostico y Control de la Erosión Hídrica en Taludes en las Laderas Norte y Sur del Yacimiento San Isidro*. Tesis. Universidad de Oriente. Ciudad Piar, estado Bolívar.

- ♣ Informe de Gestión Ambiental C.V.G Ferrominera Orinoco C.A. (1997). Departamento de Gestión Ambiental. Ciudad Guayana.
- ♣ INFANTE, Y (2003). *Caracterización de los Sedimentos de la Quebrada Arasiama, al sur del Cerro los Barrancos (Cuadrilátero Ferrífero San Isidro)*. Tesis. Universidad de Oriente. Ciudad Piar, estado Bolívar.
- ♣ KRYNINE, D. y W. JUDD (1975). Principios de Geología y Geotécnica para Ingenieros, Ediciones Omega, Barcelona.
- ♣ LAMBE, T y R. WHITMAN (1969). *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa. pp.582.
- ♣ Ministerio de Energía y Minas del Perú. (Marzo 2002) *Guía para la elaboración y revisión de planes de cierre de mina*. Disponible: [www.iipm-mpri.org/biblioteca/docs/Guía para la elaboración y revisión de planes de cierre de mina.pdf](http://www.iipm-mpri.org/biblioteca/docs/Guía para la elaboración y revisión de planes de cierre de mina.pdf). [ Consulta: 2005, Junio 22]
- ♣ Ministerio de Energía y Minas del Perú. (Mayo 2005) *Guía para la elaboración y revisión de planes de cierre de mina*. Disponible: [www.iipm-mpri.org/biblioteca/docs/Guía para la elaboración y revisión de planes de cierre de mina.pdf](http://www.iipm-mpri.org/biblioteca/docs/Guía para la elaboración y revisión de planes de cierre de mina.pdf). [ Consulta: 2006, Agosto 22]
- ♣ Ministerio de Energía y Minas del Perú. (Enero 2006). *Reglamento de CierredeMinas*. Disponible: [www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/legislacion/guias/cierreabandono.pdf](http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/legislacion/guias/cierreabandono.pdf)[ Consulta: 2006, Noviembre 01]
- ♣ MENDOZA, V (2000). *Evolución Geotectónica y Recursos Minerales del Escudo de Guayana en Venezuela*. Patrocinado por HECLA. 184p

- ♣ MINTEC, Inc (1987). “*Medsystem general training and mine sight workbook*”. Tucson, Arizona.
- ♣ NÚÑEZ, M (2000). *Manual de Técnicas Agroecológicas, serie de manuales de educación y capacitación ambiental*. Primera edición. PNUMA.
- ♣ PINILLA, K. (1999). *Alternativas para el manejo y disposición de minerales no conformes en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, estado Bolívar C. V. G Ferrominera Orinoco, C.A.* Tesis no publicada, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- ♣ PIÑA, A. (2002). *Indicadores de Sustentabilidad en la toma de decisiones para la creación de distritos mineros, aplicados a la minería metálica: Au y Fe, en el estado Bolívar*. Tesis. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- ♣ *Plan de Minas 2001-2025*. Gerencia de Minería, Superintendencia de Ingeniería de Minas. Planificación y Desarrollo de Mina. C.V.G. Ferrominera Orinoco C.A. Ciudad Piar. Estado Bolívar.
- ♣ REPERTO,F Y KAREZ,C. (1995). *Aspectos Geológicos de Protección Ambiental en América latina y el Caribe*. Curso Internacional, Volumen I. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología, Instituto de Geociencias de la Universidad Estatal de Campinas, UNICAMP, Brasil. ORCYT. UNESCO para la América latina y el Caribe. Montevideo.

- ♣ ROBERT, S y VEIGA, M. (2000). *Aspectos Generales del Cierre y Recuperación de Minas en las Américas*. Centro de Tecnología mineral (CETEM). Vancouver. 48 pp.
  
- ♣ SANABRIA, D y FARIÑAS, J (1990). *Adaptabilidad de Gramíneas y Leguminosas Forrajeras en un Paisaje de Mesa del estado Bolívar, Venezuela*.
  
- ♣ SILVA, H. (1998). *Normativa Ambiental Venezolana*. Caracas Fondo Editorial Agenda XXI
  
- ♣ SALAZAR, R (2002) *Plan de mina a largo plazo periodo 2002 – 2021 de cuadrilátero ferrífero San Isidro y mina Altamira*. Universidad de Oriente. Estado Bolívar. pp. 43 -45
  
- ♣ SUÁREZ, J. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Colombia. 555 pp.
  
- ♣ SUÁREZ, J. (1998). *Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Colombia. 548 pp.
  
- ♣ UGAS, C (1985). *Ensayos de laboratorio en mecánica de suelos*. Tercera edición. Publicación Universidad Central de Venezuela. Caracas. 275 pp.
  
- ♣ URBINA, R (2000). *Diseño para la distribución de la materia prima no conforme en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro y Mina Altamira para el periodo (2001-2015)*. Tesis. Universidad de Oriente. Ciudad Piar, estado Bolívar.

- ♣ VILLAS, R y BARRETO, M (2000). *Cierre de Minas: Experiencias en Iberoamérica*. CYTED. Brasil. 581 pp.
- ♣ WATSON, R. (Marzo 2002). *Geomecanica\_PequenaMineria/ponencias*. Disponible: [www.cytedxiii/Publicaciones/Libros/Geomecanica\\_PequenaMineria/ponencias/tema5.pdf](http://www.cytedxiii/Publicaciones/Libros/Geomecanica_PequenaMineria/ponencias/tema5.pdf) [ Consulta: 2007, Febrero 17]