



Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe



Programa Hidrológico Internacional



# AGUA Y MINERÍA EN CUENCAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS GUÍA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL

Proyecto CAMINAR

Gestión de Cuencas con Actividad Minera en Regiones Áridas y Semiáridas en Sudamérica

# phi-LAC

Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe

PHI-VII / Documento Técnico N° 17



**AGUA Y MINERÍA  
EN CUENCAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS:  
GUÍA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL**



**Publicado en el 2009 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).**

**Documento Técnico del PHI-LAC, N° 17**

**ISBN 978-92-9089-136-9**

**© UNESCO 2009**

**Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.**

**Se autoriza la reproducción, a condición de que la fuente se mencione en forma apropiada, y se envíe copia a la dirección abajo citada. Este documento debe citarse como:**

**UNESCO, 2009. Agua y Minería en Cuencas Áridas y Semiáridas: Guía para la Gestión Integral. Proyecto CAMINAR: Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America / Gestión de Cuencas con Actividad Minera en Regiones Áridas y Semiáridas en Sudamérica. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°17.**

**Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:**

**Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe  
UNESCO**

**Dr. Luis P. Piera 1992, 2° piso**

**11200 Montevideo, Uruguay**

**Tel.: + 598 2 413 2075**

**Fax: + 598 2 413 2094**

**E-mail: [phi@unesco.org.uy](mailto:phi@unesco.org.uy)**

**<http://www.unesco.org.uy/phi>**

**Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas para América Latina y el Caribe (CAZALAC)**

**Benavente 980**

**La Serena, Chile**

**Tel.: 56 51 204 493**

**Fax: 56 51 204 493**

**E-mail: [cazalac@cazalac.org](mailto:cazalac@cazalac.org)**

**<http://www.cazalac.org>**

## **EQUIPO DE REALIZACIÓN**

### **DIRECCIÓN:**

UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE, Reino Unido.  
UNIVERSIDAD DE OVIEDO, España.  
SCHLUMBERGER WATER SERVICES, Chile

### **AUTORES:**

Jorge Loredó Pérez  
Antonio Luís Marqués Sierra  
*Universidad de Oviedo*

Christopher Beggs  
Marcela Venegas  
*Schlumberger Water Services*

Jaime M. Amezaga  
Tobias S. Rötting  
Paul L. Younger  
*University of Newcastle upon Tyne*

### **CORRECCIÓN EDITORIAL:**

Virginia López Castellanos

© UNESCO 2009  
Documento Técnico del PHI-LAC, N° 17  
ISBN 978-92-9089-136-9

Maquetación: Departamento de Explotación y Prospección de Minas  
Antonio Luis Marqués Sierra  
Efren García Ordiales

Impresión: Mores Digital.

### **Como citar este libro:**

UNESCO, 2009. Agua y Minería en Cuencas Áridas y Semiáridas: Guía para la Gestión Integral. Proyecto CAMINAR: Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America / Gestión de Cuencas con Actividad Minera en Regiones Áridas y Semiáridas en Sudamérica. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°17.



El proyecto CAMINAR es co-financiado por la Comisión Europea a través de su 6º Programa Marco de Cooperación Internacional, contrato No. INCO-CT2006-032539.



### ENTIDADES QUE FORMAN EL CONSORCIO:



UNIVERSIDAD DE OVIEDO





**AGUA Y MINERÍA  
EN CUENCAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS:  
GUÍA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL**

**2009**





## **AVISO LEGAL**

Este documento ha sido elaborado dentro del proyecto CAMINAR (Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America; Gestión de Cuencas con Actividad Minera en Regiones Áridas y Semiáridas en Sudamérica), contrato n°. INCO-CT2006-032539, co-financiado por la Comisión Europea a través de su Sexto Programa Marco de Cooperación Internacional.

**La información en este documento se proporciona como tal y no se da garantía que la información sea apta para cualquier propósito particular. El usuario utiliza esta información a su exclusivo riesgo y responsabilidad. Este documento no representa la política o la opinión oficial de la Comisión, del Parlamento o del Consejo Europeo.**



## AGRADECIMIENTOS

En la elaboración de esta guía ha contribuido la mayoría de los integrantes del proyecto CAMINAR. Los autores agradecen su valiosa colaboración:

Anthony Jo Noles, Edwin Guzman Espezua, Yrasema Pacheco Mena, Doris Balvin Diaz, Karina Virginia Peña Orocaja y Jose Luis López Follegatti de Asociación Civil Labor, Perú.

Percy Carlos Jimenez Milón, Jose Godofredo Peña Davila y Crisia Vivanco Chavez de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), Peru.

Jorge Emilio Quintanilla Aguirre, Maria Eugenia García Moreno, Oswaldo E. Ramos Ramos, Amalia Niura Zurita y Elvira Guisbert Huanca de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Bolivia.

José Lorini Lapachet y Carlos Peláez Daza del Centro de Estudios Ecológicos y Desarrollo Integral (CEEDI), Bolivia.

Guido Soto, Manuel Soto y Michelle Señoret del Water Center for Arid and Semi-Arid Zones in Latin America and the Caribbean (CAZALAC), Chile.

Nicole Kretschmer del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Chile.

Ricardo Oyarzún, del Departamento Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena y CEAZA, Chile

Jorge Oyarzún y Hugo Maturana, del Departamento Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena, Chile.

Efrén García Ordiales y Lucía Noriega Escobedo de la Universidad de Oviedo, España.

Luís Ribeiro, Ana Buxo y João Nascimento del Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

La sección sobre Análisis de Riesgos fue preparada en colaboración con Basilio Espildora Couso, Santiago de Chile.

Axel Dourojeanni por sus apreciaciones al borrador del documento.

Un agradecimiento especial a todas las personas e instituciones que han participado en los grupos de diálogo a nivel de cuenca y nacional en Perú, Bolivia y Chile, por su interés en el proyecto, y por los aportes y comentarios realizados a lo largo de estos años de trabajo, porque en esencia ellos son los artífices de esta guía.



## RESUMEN EJECUTIVO

Ante la creciente demanda para los recursos hídricos, en momentos cuando la amenaza de cambios climáticos hace cada vez más incierto la disponibilidad del agua dulce, varias de las entidades internacionales han iniciado programas y proyectos con el fin de mejorar la gestión y la conservación del agua.

El Proyecto CAMINAR (Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America; Gestión de Cuencas con Actividad Minera en Regiones Áridas y Semiáridas en Sudamérica) del Sexto Programa Marco de la Comisión Europeo está dirigido a la mejora de la gestión de agua y las actividades mineras en las zonas áridas y semiáridas de Sudamérica, teniendo como áreas piloto cuencas de Perú, Bolivia y Chile, países cuyas economías dependen en gran parte de las exportaciones de los recursos naturales, en particular los metales provenientes de la industria minera. El crecimiento explosivo de la minería en los últimos 10 años, fomentado por la demanda internacional de metales, ha ido acompañado en los países mineros por una competencia por el recurso agua, componente esencial para el procesado del mineral, con los usuarios tradicionales y los agricultores comerciales, que también han visto crecer sus oportunidades de exportar sus productos a los mercados del hemisferio norte.

El presente libro está separado en dos temas principales:

- Planificación de la gestión de agua
- La gestión minera en zonas áridas y semiáridas

### Planificación de la Gestión de Agua

Como clave en la Gestión de Agua, sea a nivel de una operación minera o a nivel de cuenca, no se puede desestimar la importancia de tener un Plan de Gestión por escrito y a conocimiento de todos los involucrados (grupos de interés; stakeholders).

El reconocimiento de los riesgos asociados con el suministro de agua y la conservación de su calidad es un paso fundamental en la formulación del Plan de Gestión. El libro pone énfasis en la identificación y evaluación de riesgos porque no son solamente amenazas a personas u operaciones, también pueden afectar a terceros. La evaluación de riesgos tiene un componente estratégico importante por las decisiones tomadas, que tienen impactos a largo plazo.

Los componentes del Plan de Gestión son presentados, tomando en cuenta la política y los compromisos necesarios, los datos tanto de línea base como la recopilación periódica de datos, y las expectativas y necesidades de las comunidades y otros usuarios potencialmente afectados por el Plan.

Se ha incluido un resumen de la normativa pertinente a la gestión de agua, pero las leyes y reglamentos dependen de cada país y el libro no pretende ser un punto referente a toda la legislación nacional relacionada con el agua y, por extensión, con la gestión ambiental. El lector de la guía debe informarse respecto al detalle legislativo en su respectivo país o a través de las páginas web

del gobierno del país. Por tratar de asuntos potencialmente complicados, frente cualquier duda hay que consultar a un asesor legal.

La implementación del Plan de Gestión pone primero los objetivos del plan: minimizar impactos, tener un uso de agua eficiente, y buscar oportunidades de mejorar la gestión. La administración del plan de gestión y las responsabilidades que impone el Plan deben ser claramente definidas. La difusión del Plan a los grupos de interés y una capacitación adecuada del personal encargado de su operación también son puntos clave de la gestión.

Sin una monitorización adecuada de los indicadores del plan: consumo de agua, calidad de agua, reclamaciones, etc. el Plan no sirve. El mantenimiento de registros actualizados es fundamental para que la gestión funcione y para permitir una auditoría periódica del Plan.

## **Gestión Minera en Zonas Áridas y Semiáridas**

En las secciones 3, 4 y 5 del libro trata de la Gestión Minera y considera las acciones preventivas y correctivas para cuidar la calidad de agua y el impacto de las actividades mineras en cada una de las fases del Ciclo de Vida de una mina.

Empezando con la fase de exploración y evaluación económica, indica las buenas prácticas a aplicar incluyendo un Plan de Defensa Hidrogeológico, para cuidar los recursos de agua subterránea y un Plan de Actuación Sociocultural.

Las medidas de protección y mitigación durante la fase de construcción y operación ocupan un gran parte de esta sección. Siguiendo los flujos de material durante la operación se pueden apreciar las medidas indicadas para controlar los materiales sólidos, líquidos y las emisiones al aire de partículas y gases. Se resalta la importancia de un buena gestión de las escombreras de estéril y la posibilidad de instalación de cubiertas. Se mencionan técnicas emergentes, como el co-vertido de lodos espesados con el estéril, que conducen a la correcta gestión de los lodos de proceso y de la flotación. Respecto a las balsas de lodos se enfatiza la inestabilidad de las presas de arena formadas aguas arriba, especialmente en zonas sísmicas, debido a su facilidad de licuefacción. También se tratan los métodos de lodos espesados y en pasta para operaciones mineras de tamaño medio.

La fase de cierre y post-cierre incluye el problema de generación de aguas ácidas de mina (DAM) y algunos de los métodos para prevenir y tratarlas, los potenciales impactos sobre el balance hidrológico y los impactos sobre las aguas subterráneas.

Dada la importancia de la minería pequeña y artesanal en los países sudamericanos, se ha incluido una sección sobre los desafíos que enfrenta la minería de menor escala y con escasos recursos económicos. Especialmente preocupante es el uso de mercurio en las pequeñas operaciones de minas de oro que frecuentemente funcionan con grupos familiares con graves riesgos a la salud.

Con posterioridad, se trata el problema de los pasivos mineros ambientales que son los legados de las operaciones mineras del pasado, muchas veces abandonadas, pero que siguen presentando riesgos físicos y químicos. Generalmente el tratamiento de estos pasivos ambientales queda en las manos de las agencias estatales por no existir “dueños” de las minas antiguas abandonadas. Se men-

cionan los métodos de tratamiento pasivo usando medios inorgánicos como la caliza y los métodos orgánicos aeróbicos y anaeróbicos.

En conclusión, se sostiene que la armonización de la producción minera con el manejo integral de los otros recursos naturales precisa de la adopción de una perspectiva de cuenca, como el marco de referencia básico para la gestión de agua en operaciones mineras. El marco de cuenca ayuda no solamente a la gestión técnica; por la naturaleza de la distribución de poblaciones humanas, la cuenca también ofrece un marco natural para facilitar el diálogo multi-sectorial, respaldando así los argumentos para la ‘licencia social para operar’. En vez de abordar los problemas de manejo de recursos acuáticos escasos de modo reactivo, se sostiene que las empresas mineras que adoptan una postura proactiva en cuanto a manejo de cuencas tienen la posibilidad de convertirse en compañías de recursos naturales en su totalidad, aprovechando la alta pericia en geología, hidrogeología, establecimiento de suelos y crecimiento de plantas que las mismas empresas ya tienen. Así, la empresa proactiva podría convertirse en el líder de desarrollo sostenible en cada cuenca.







**INDICE**



# ÍNDICE

AVISO LEGAL.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN EJECUTIVO.....	ix
ÍNDICE.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xx
GLOSARIO.....	xxii
ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES.....	xxv
PREFACIO.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 Objetivo de la Guía.....	8
1.2 Enfoque de la Guía.....	9
1.3 El Agua en Zonas Áridas y Semiáridas.....	11
1.3.1 Aguas Superficiales.....	11
1.3.1.1 Bofedales o Turberas.....	11
1.3.1.2 Salares.....	13
1.3.2 Aguas Subterráneas.....	14
1.3.3 Glaciares.....	15
2 PLANIFICACIÓN DEL AGUA EN OPERACIONES MINERAS EN EL CONTEXTO DE UNA CUENCA.....	19
2.1 Plan de Gestión.....	19
2.2 Componentes de un Plan de Gestión de Agua.....	21
2.2.1 Objetivos Estratégicos del Plan de Gestión.....	22
2.2.2 Política y Compromiso.....	24
2.2.3 Datos de Línea Base.....	25
2.2.4 Balance de Agua.....	26
2.2.5 Participación de los Grupos de Interés.....	27
2.2.5.1 Expectativas de la Comunidad.....	27
2.2.5.2 Otros Usuarios.....	29
2.2.6 Riesgos.....	29
2.2.7 Gestión Ambiental.....	30
2.3 Reglamentos y Normas.....	32
2.3.1 Marco Legal Administrativo.....	32
2.3.1.1 Permisos y Licencias para Operar.....	32
2.3.1.2 Evaluación del Impacto Ambiental.....	34
2.3.1.3 Cumplimiento con Estándares de Emisiones.....	36
2.3.2 Derechos de Agua.....	39
2.3.3 Derechos de Pueblos Originarios.....	39
2.4 Implementación del Plan de Gestión de Agua.....	41
2.4.1 Aspectos del Plan.....	41
2.4.1.1 Administración y Responsabilidades Definidas.....	41
2.4.1.2 Operación Controlada.....	42

2.4.1.3	Capacitación Adecuada de Personal.....	44
2.4.1.4	Agregar Valor donde sea Posible.....	44
2.4.1.5	Oportunidades para Mejorar la Gestión.....	44
2.4.2	Participación de los Grupos de Interés (Stakeholders).....	44
2.4.2.1	Foros de Diálogo.....	46
2.4.2.2	Entidades de Gestión de Cuenca o de Consultación.....	49
2.4.2.3	Proyectos Mineros y Poblaciones Cercanas.....	50
2.4.3	Monitorización.....	51
2.4.3.1	Plan de Monitorización durante la Fase de Exploración.....	54
2.4.3.2	Monitorización durante la Fase de Explotación.....	55
2.4.3.3	Monitorización durante la Fase de Cierre y Post-Cierre.....	56
2.4.4	Registro de Resultados e Informes.....	58
2.4.5	Transparencia de Resultados y Gestión.....	58
2.4.6	Planes de Respuesta ante Emergencias.....	59
2.4.7	Auditoria de los Sistemas de Gestión.....	60
2.5	Herramientas.....	61
2.5.1	Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	61
2.5.2	Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD).....	62
2.6	Evaluación y Control de Riesgos.....	64
2.6.1	Tipos de Riesgos.....	65
2.6.1.1	Riesgos Estratégicos.....	65
2.6.1.2	Riesgos Operacionales.....	65
2.6.1.3	Riesgos a Terceros.....	66
2.6.1.4	Riesgos al Medio Ambiente.....	66
2.6.2	Conceptos y Definiciones Básicas.....	66
2.6.3	Origen y Generación de Peligros y Riesgos.....	67
2.6.4	El Proceso de Gestión de Riesgos.....	71
2.6.5	Herramientas y Metodologías de Análisis de Riesgos.....	73
2.6.5.1	Índice Básico de la Magnitud del Riesgo.....	73
2.6.5.2	Matrices y Mapas de Riesgos.....	74
2.6.6	Métodos Cualitativos de Análisis de Riesgos.....	75
2.6.7	Métodos Cuantitativos de Análisis de Riesgos.....	75
3	GESTION DE AGUA EN LA MINERÍA MEDIANA Y A GRAN ESCALA EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS.....	79
3.1	Introducción.....	79
3.2	Ciclo de Vida en la Minería Mediana y a Gran Escala.....	82
3.3	Fase de Exploración y Evaluación Económica.....	83
3.3.1	Línea Base Ambiental.....	85
3.3.2	Estudio de Impacto Ambiental y Estudio Hidrogeológico.....	86
3.3.3	Plan Hidrogeológico de Defensa.....	86
3.3.4	Fuentes de Agua.....	88
3.3.5	Plan de Actuación Sociocultural.....	90
3.4	Fase de Explotación (Construcción y Operación).....	91
3.4.1	Construcción.....	91
3.4.1.1	Impactos sobre las Aguas Superficiales.....	95
3.4.1.2	Impactos sobre las Aguas Subterráneas.....	96
3.4.2	Operación.....	101

3.4.3	Flujos de Material durante la Fase de Explotación.....	103
3.4.4	Gestión de los Flujos de Agua.....	105
3.4.4.1	Balance de Agua de la Operación.....	105
3.4.4.2	Gestion dentro de cada componente de la operación (balance de agua por componente).....	107
3.4.4.3	Posibles fuentes de Contaminación del Agua.....	107
3.4.4.4	Evolución de la demanda de Agua a lo largo del Ciclo de Vida.....	108
3.4.5	Drenaje Ácido.....	109
3.4.5.1	Descripción Química de la Formación de Drenaje Ácido.....	109
3.4.5.2	Minerales Generadores de Acidez (MGA).....	110
3.4.5.3	Metodologías de Predicción de Generación de Aguas Ácidas.....	111
3.4.5.4	Prevención y Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina.....	113
3.4.6	Mejores Técnicas Disponibles para la Gestión del Agua.....	115
3.4.6.1	Uso Eficiente de Agua.....	115
3.4.6.2	Descarga Cero.....	118
3.4.6.3	Sistemas de Bombeo-Reinyección.....	118
3.4.6.4	Oportunidades de reutilización o reciclaje de agua.....	119
3.4.7	Material de Recubrimiento y Estéril.....	119
3.4.7.1	Factores para la Ubicación de las Escombreras.....	121
3.4.7.2	Mejores Técnicas Disponibles para la Gestión de Estériles.....	123
3.4.7.3	Técnicas Emergentes para la Gestión de Estériles.....	124
3.4.7.4	Efluentes de Proceso y Lodos de Flotación.....	127
3.4.7.5	Vertido de Lodos del Proceso de Concentración.....	129
3.4.7.6	Elección del Emplazamiento de Balsas de Lodos.....	133
3.4.7.7	Mejores Técnicas Disponibles para el Vertido de Lodos.....	134
3.4.7.8	Técnicas Emergentes para la Gestión de Efluentes de Proceso.....	139
3.4.8	Gestión de Soluciones Cianuradas en Operaciones Mineras.....	142
3.4.9	Emisiones al Aire.....	142
3.4.9.1	Mejores Técnicas Disponibles para la Gestión de Emisiones al Aire.....	143
3.4.10	Sistemas de Cubierta.....	144
3.4.10.1	Tipos de Cubiertas.....	145
3.4.10.2	Problemática Asociada a las Cubiertas.....	146
3.5	Fase de Cierre de la Explotación.....	147
3.5.1	Plan de Cierre.....	148
3.5.2	Impactos del Cierre sobre el Medio Hídrico.....	150
3.5.2.1	Rebote.....	150
3.5.2.2	Primer Lavado.....	151
3.5.2.3	Cambios permanentes en el balance de agua.....	152
3.6	Fase Post-Cierre.....	153
3.6.1	Tareas en la Fase de Post-Cierre.....	153
3.6.2	Puesta en Uso Productivo de los Terrenos Recuperados.....	153
4	GESTION DE AGUA EN LA MINERÍA ARTESANAL Y A PEQUEÑA ESCALA.....	159
4.1	Introducción.....	159
4.1.1	Diferencias entre la Minería Artesanal y a Pequeña Escala.....	159
4.1.2	Ciclo de Vida de la Minería Artesanal y a Pequeña Escala.....	160
4.2	Impactos Asociados con la Artesanal y a Pequeña Escala.....	161
4.2.1	Fase de Explotación.....	166

	4.2.2	Gestión del mercurio.....	167
	4.2.3	Fase de Abandono de la Explotación.....	168
5		PASIVOS AMBIENTALES MINEROS.....	171
	5.1	Introducción.....	171
	5.2	Estudio de los Pasivos Ambientales Mineros.....	172
	5.3	Introducción a los Tratamientos Pasivos de Aguas de Mina.....	173
	5.3.1	Sistemas Tipo “Humedal”.....	175
	5.3.1.1	Balsas de Sedimentación.....	175
	5.3.1.2	Humedales Aerobios (Aerobic Wetlands).....	175
	5.3.1.3	Humedales de Sustrato Orgánico (Compost Wetlands).....	176
	5.3.2	Los Sistemas Pasivos de Medio Inorgánico (IMPs).....	177
	5.3.2.1	Canales Anóxicos de Caliza (ALDs, Anoxic Limestone Drains).....	177
	5.3.2.2	Drenes Calizos en Condiciones Oxidantes (OLDs, Oxic Limestone Drain) y Reactores Aerobios (OCLRs, Open Channel Limestone Reactors).....	178
	5.3.3	Sistemas de Flujo Subsuperficial con Actividad Bacteriana Sulfatoredutora.....	179
	5.3.3.1	Barreras Reactivas Permeables (PRB, Permeable Reactive Barrier).....	179
	5.3.3.2	Reactores Anaerobios para el Tratamiento de Aguas de Mina Superficiales.....	180
	5.3.4	Sistemas Reductores y Generadores de Alcalinidad (RAPS, Reducing and Alkalinity Producing Systems).....	180
	5.4	Técnicas de Remediación de Suelos Contaminados y Residuos Sólidos.....	180
	5.5	Técnicas Emergentes para la Gestión de Pasivos Mineros.....	182
	5.5.1	Tratamiento Activo de Aguas Ácidas de Mina para Otros Usos Comerciales.....	182
	5.5.2	Reciclaje de estériles de mina y balsas de lodos.....	182
	5.5.3	Fitoremediación.....	182
	5.5.4	Uso de Tecnosoles para la rehabilitación de espacios degradados.....	184
6		CONCLUSIONES.....	189
7		BIBLIOGRAFÍA.....	193

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Resumen de Políticas y Compromisos.....	24
Tabla 2.2	Datos de Línea Base.....	25
Tabla 2.3	Relaciones Comunitarias.....	28
Tabla 2.4	Otros Usos de Agua.....	29
Tabla 2.5	Riesgos.....	30
Tabla 2.6	Gestión Ambiental y Etapas de Vida del proyecto.....	31
Tabla 2.7	Instancias de Organización de Cuencas.....	33
Tabla 2.8	Normativa Relevante de Calidad de Aguas en Chile.....	37
Tabla 2.9	Normativa Relevante de Calidad de Aguas en Perú.....	38
Tabla 2.10	Aspectos del Suministro de Agua que Generan Potenciales Riesgos a la Operación....	68
Tabla 2.11	Identificación de Peligros y Riesgos.....	69
Tabla 2.12	Potenciales Riesgos al Recurso Hídrico Generados en la Cuenca y para Terceros.....	70
Tabla 3.1	Buenas prácticas durante la Fase de Exploración y Evaluación Económica.....	84
Tabla 3.2	Información Necesaria para una Línea Base Ambiental.....	85
Tabla 3.3	Fuentes de Agua.....	88
Tabla 3.4	Elementos por considerar - Fase de Explotación.....	93
Tabla 3.5	Potenciales Impactos - Fase de Explotación.....	94
Tabla 3.6	Usos de Agua en Operaciones Mineras.....	101
Tabla 3.7	Resumen de los Procesos Mineros.....	101
Tabla 3.8	Gestión de Materiales Durante el Proceso Minero.....	104
Tabla 3.9	Fuentes de contaminación de Aguas de Mina.....	107
Tabla 3.10	Pruebas Típicas para Determinar el Potencial de Generar Ácido.....	112
Tabla 3.11	Selección del Emplazamiento de Escombreras.....	123
Tabla 3.12	Necesidades de Agua Específicas para Obtener un Determinado Mineral .....	127
Tabla 3.13	Ventajas y Desventajas de los Métodos de Construcción de Balsas de Lodos.....	131
Tabla 3.14	Factores que Influyen en la Ubicación y Diseño de las Balsas.....	134
Tabla 3.15	Principales Recomendaciones para Minimizar la Contaminación del Aire.....	143
Tabla 3.16	Recubrimiento de Escombreras de Estériles y Balsas de Lodos.....	144
Tabla 3.17	Claves para el Cierre de una Operación Minera.....	149
Tabla 3.18	Contenido Técnico de un Plan de Cierre.....	149
Tabla 3.19	Aspectos Principales de un Plan de Cierre.....	150
Tabla 4.1	Impactos Típicos de las Operaciones Mineras Pequeñas en el Medio Socioeconómico y Cultural.....	162
Tabla 4.2	Impactos Típicos de las Operaciones Mineras Pequeñas en el Medio Físico.....	163
Tabla 5.1	Problemas Clave de los Pasivos Mineros.....	171
Tabla 5.2	Costes de Operación Estimados para las Tecnologías Aplicadas para Remediación de Suelos Contaminados por Metales Pesados.....	181



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Área del Proyecto CAMINAR.....	10
Figura 1.2	Gestión Integrada de Agua a Nivel de Cuenca.....	11
Figura 1.3	Bofedal en el Altiplano.....	12
Figura 1.4	Salar en el Altiplano.....	13
Figura 1.5	Glaciar en la Cordillera Montañosa Boliviana.....	15
Figura 2.1	Componentes de un Plan de Gestión de Agua.....	22
Figura 2.2	Marco Estratégico de la Gestión del Agua.....	23
Figura 2.3	Esquema Simplificado de Flujos de Agua en una Cuenca Minera.....	26
Figura 2.4	Organización Típica para la Gestión de Cuencas.....	41
Figura 2.5	Organigrama Típico de Gestión de Agua en Proyecto Minero.....	42
Figura 2.6	Diagrama de Monitorización durante la Fase de Exploración.....	54
Figura 2.7	Esquema de la Fase de Monitorización durante la Explotación de la Mina.....	56
Figura 2.8	Esquema de la Fase de Monitorización durante el Cierre y Post-Cierre de una Mina.....	57
Figura 2.9	Diagrama de Flujo de un Programa de Auditorías.....	60
Figura 2.10	Sistema de Información Geográfica de la cuenca del Lago Poopó, Bolivia.....	61
Figura 2.11	Esquema de un Sistema de Soporte de Decisiones.....	62
Figura 2.12	Proceso de Análisis y Gestión de Riesgos.....	73
Figura 2.13	Matriz de Análisis de Riesgos.....	74
Figura 3.1	Interrelación de Diversos Aspectos con la Minería.....	80
Figura 3.2	Precio de Oro de los Últimos 41 años, en US\$ por Onza Troy.....	80
Figura 3.3	Bocamina de Mina San José, Oruro (Bolivia).....	81
Figura 3.4	Fases de Vida de una Mina.....	82
Figura 3.5	Ciclo de Exploración y Evaluación Económica.....	87
Figura 3.6	Ciclo de Exploración y Evaluación Económica.....	92
Figura 3.7	Modificación de los niveles freáticos y piezométricos debidos a la actividad minera.....	96
Figura 3.8	Sondeos de Exploración Abandonados sin Sellar, descargando Aguas Ácidas de Mina.....	97
Figura 3.9	Tipología de Huecos Mineros Inundados.....	99
Figura 3.10	Balance de Agua.....	106
Figura 3.11	Balance de Agua.....	106
Figura 3.12	Ejemplo de un Balance de Agua por Componente.....	107
Figura 3.13	Variación de la demanda durante la vida de un proyecto minero.....	109
Figura 3.14	Ejemplos de Minerales Generadores de Acidez. Izquierda: en el Tajo de una Mina a Cielo Abierto de Oro, Ghana. Derecha: Aluminocopiapita (blanco) encima de Szomolnokita (turquesa) en una Galería Subterránea, Milluni, Bolivia.....	111
Figura 3.15	Modelo de Bombeo – Reinyección en Cobre las Cruces.....	119
Figura 3.16	Relación entre Metal Obtenido y Desechos Generados.....	120
Figura 3.17	Aspecto típico de los Estériles de una Escombrera.....	120
Figura 3.18	Tipología de las Escombreras según su Ubicación.....	121
Figura 3.19	Formación de Escombreras.....	122
Figura 3.20	Vertido Selectivo de los Materiales.....	123

Figura 3.21	Esquema de una Escombrera con Disposición Selectiva de los Materiales.....	124
Figura 3.22	Vertido de la Pasta.....	125
Figura 3.23	Esquema del Proceso de Microencapsulado de Materiales Reactivos.....	126
Figura 3.24	Curvas Granulométricas Tipo para Diferentes Metales Tratados.....	129
Figura 3.25	Esquema de Construcción de una Balsa por el Método Aguas Arriba.....	130
Figura 3.26	Esquema de Construcción de una Balsa por el Método Aguas Abajo.....	130
Figura 3.27	Esquema de Construcción de una Balsa por el Método de Línea Central.....	131
Figura 3.28	Tipología de las Balsas de Lodos.....	133
Figura 3.29	Procedencia y Flujo del Agua en las Balsas de Lodos.....	133
Figura 3.30	Vertido de Lodos Espesados.....	135
Figura 3.31	Relleno de Corta.....	136
Figura 3.32	Ciclo del Agua en una Planta de Tratamiento de Minerales.....	136
Figura 3.33	Modos de Recuperación del Agua de las Balsas de Lodos. Punto central (arriba), Plataforma móvil (abajo).....	137
Figura 3.34	Viento Levantando Polvo en una Balsa de Lodos.....	139
Figura 3.35	Esquema de una sección de una balsa convencional.....	140
Figura 3.36	Esquema de una sección de una balsa con vertido tipo pasta.....	140
Figura 3.37	Tipos de Lodos en Función de su Contenido en Sólidos.....	141
Figura 3.38	Vertido en Forma de Pasta mediante Cinta Transportadora.....	141
Figura 3.39	Colocación de un Geotextil de una Cubierta Seca.....	145
Figura 3.40	Distintos Tipos de Coberturas Secas.....	146
Figura 3.41	Ciclo de Vida de una Mina Típica de Tamaño Medio en Australia.....	144
Figura 3.42	Rebote de Agua en una Mina Subterránea tras el Cierre.....	151
Figura 3.43	Primer Lavado.....	152
Figura 3.44	Factores del Medio Físico a Tener en Cuenta y Acondicionamiento del Terreno para Instaurar un uso Determinado.....	154
Figura 3.45	Proceso para la Evaluación de Usos Alternativos del Terreno.....	155
Figura 4.1	Explotación Artesanal de una Balsa de Lodos Abandonada en Bolivia.....	160
Figura 4.2	Ciclo de Vida de una Mina Artesanal.....	161
Figura 5.1	Esquema del diagrama de flujo para la Selección de Tratamientos Pasivos de Aguas Acidas.....	174
Figura 5.2	Esquema de un Humedal Aerobio.....	176
Figura 5.3	Esquema de un Humedal Anaerobio o de Sustrato Orgánico .....	177
Figura 5.4	Esquema de un ALD.....	178
Figura 5.5	Esquema de un OLD.....	178
Figura 5.6	Esquema de un OLC.....	179
Figura 5.7	Esquema de una Barrera Permeable.....	179
Figura 5.8	Esquema del Sistema RAPS.....	180
Figura 5.9	Esquema del Proceso de Fitoextracción.....	183
Figura 5.10	Esquema de los Procesos de Fitoestabilización.....	184

## GLOSARIO

**Agua desalada:** Se trata de agua que se obtiene a partir del proceso de eliminar la sal del agua de mar o aguas salobres, obteniendo agua dulce.

**Balsa de lodos:** Una acumulación de materiales depositados en forma de lodos dentro de la estructura natural o artificial de contención. Dique de Relaves, Dique de Colas (Per, Bol), Tranque de Relaves (Chi)

**Bofedal:** 1. Prados turbosos de origen infraacuático, compuestos principalmente por plantas de las familias Cyperaceae y Juncaceae, a menudo de crecimiento compacto o en cojín, que se encuentran en áreas pantanosas del altiplano y la puna.; 2. Ciénaga de páramo o de puna andina, creada por las prácticas agrícolas de irrigación y las prácticas ganaderas de abrevadero en el suelo. Propia de la topografía y la hidrología de las zonas palustres altoandinas deforestadas. (Sarmiento 2000)

**Corta minera:** Método minero para la el laboreo de minerales a cielo abierto.

**Cuenca hidrográfica:** Territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico.

**Desalación:** Proceso mediante el cual se elimina la sal del agua de mar o aguas salobres, obteniendo agua dulce.

**Desarrollo sostenible:** El desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para enfrentarse a sus propias necesidades (Comisión Brundtland, 1987)

**Escombrera:** Lugar donde se depositan y acumulan residuos sólidos inertes producidos en las operaciones mineras. Botadero (Chi); Desmonte (Per);

**Estéril:** Estéril de mina es todo material sin valor económico extraído para permitir la explotación del mineral útil.

**Evapotranspiración:** La pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

**Explosión de roca:** Explosión que se produce en las galerías de mina como consecuencia de una presión del terreno superior a la que admite la formación rocosa. Se produce en minas muy profundas o durante terremotos.

**Fitoremediación:** Es una tecnología emergente que utiliza plantas para remediar aire, suelos, sedimentos, agua superficial y agua subterránea contaminadas.

**Flotación:** Proceso de concentración mediante el cual las partículas de un mineral son inducidas a adherirse a las burbujas creadas por un agente espumante presente en la pulpa, que las hace flotar.

**Hastial:** Cada una de las superficies o planos rocosos que limitan un filón con el borde de las rocas encajantes.

**Hietograma:** Grafico que representa la precipitación en función del tiempo.

**Hueco de explotación, hueco minero:** Vacío creado por el hombre durante una operación minera a cielo abierto o de interior.

**Gestión de Cuenca o de Agua:** Operaciones de gestión centradas casi exclusivamente en captar, regular, controlar, aprovechar y tratar el recurso agua haciendo uso de obras hidráulicas auxiliares.

**Lago minero:** Masa de agua artificial creada por una operación minera.

**Lodos:** Se entiende por lodo la suspensión de sólidos en un líquido, provenientes de tratamiento de minerales mediante un proceso de concentración en húmedo.

**Manejo de Cuenca:** También se puede encontrar como adecuación o modificación de la cuenca. Hace referencia a las modificaciones realizadas o planificadas en una pequeña cuenca para modificar la escorrentía haciendo uso de diversas técnicas agroforestales.

**Microencapsulado:** Técnica emergente para el control de la generación de aguas ácidas basada en la generación de un encapsulamiento de las partículas reactivas.

**Mineralurgia:** Ciencia que estudia los procesos de concentración de mineral.

**Minería a cielo abierto:** Minería realizada mediante la creación de un hueco de grandes dimensiones para poder acceder a la zona mineralizada. Rajo Abierto, Tajo Abierto.

**Minería de interior:** Minería realizada mediante la creación de una o varias galerías o pozos para poder acceder a la zona mineralizada.

**Planta de concentración:** Centro industrial donde se produce el concentrado de especies minerales de interés económico.

**Subsidencia:** Hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras

**Tecnosol:** Suelo artificial creado por el hombre con unas características específicas para un fin determinado.

**Trituración:** Proceso de fragmentación mecánico usado para realizar la disminución de tamaño de las rocas para facilitar el proceso de concentración posterior.

**Uso consuntivo:** Uso del agua en el cual el recurso se consume, es decir entra mas agua en el proceso de la que es devuelta el medio ambiente.



## ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

ACCH	Autoridad Autónoma de Cuenca Hidrográfica (Perú)
ALD	Anoxic Limestone Drains (Dren Anóxico de Caliza)
AMIAC	Actividades Mineras Menores con Impactos Ambientales Conocidos (Bolivia)
CAMINAR	Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America
CD-C3	Certificado de Dispensación Ambiental Categoría 3 (Bolivia)
CD-C4	Certificado de Dispensación Ambiental Categoría 4 (Bolivia)
CNR	Comisión Nacional de Riego (Chile)
COMIBOL	Corporación Minera de Bolivia
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente (Chile)
DAA	Declaratorio de Adecuación Ambiental (Bolivia)
DAM	Drenaje Acido de Mina
DAR	Drenaje Acido de Roca
DGA	Dirección General de Agua (Chile)
DGAAM	Dirección General de Asuntos Ambientales (Perú)
DIA	Declaratorio de Impacto Ambiental (Bolivia)
DIA	Declaración de Impacto Ambiental (Chile)
DOH	Dirección de Obras Hidráulicas (Chile)
EEIA	Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental
ERMISA	Environmental Regulation of Mine Waters in South America
ERMITE	Environmental Regulation of Mine waTers in the European Union
GARD	Global Acid Rock Drainage
GRI	Global Reporting Initiative
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales (Perú)
ICOLD	International Committee on Large Dams
LMP	Límite Máximo Permisible
MGA	Minerales Generadores de Acidez
MINEM	Ministerio de Energía y Minería (Perú)
MMSD	Mining, Minerals and Sustainable Development.
NCh	Norma Chilena
ONG	Organización No Gubernamental
PERCAN	Programa de Reforma del Sector de Recursos Minerales del Perú
PGA	Plan de Gestión de Agua
PIRAMID	Passive In-situ Remediation of Acid Mine / Industrial Drainage
RAAM	Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (Bolivia)
RILES	Residuos Industriales Líquidos (Chile)
RLMA	Reglamento de la Ley de Medio Ambiente (Bolivia)
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (Chile)





**PREFACIO**





## PREFACIO

“Nunca sabemos el valor de agua hasta que se seca el pozo”

Benjamín Franklin (1706 - 1790) político, científico e inventor estadounidense.

El desarrollo y supervivencia de vida en la Tierra depende del agua. El agua es el elemento que, hasta el momento por lo menos, distingue la Tierra de otros planetas. El agua es aporte para la vida, y muchas de las actividades esenciales para nuestra salud y bienestar dependen de ella. Desde los principios de la civilización el hombre ha aprovechado el agua y existen evidencias de obras y reglamentos concernientes a la gestión del agua desde las civilizaciones Babilónicas y Asirias en Mesopotamia, Egipto y el imperio Romano. Las mismas culturas andinas desarrollaron con éxito sofisticados métodos de gestión de este recurso en sus zonas de influencia.

Con el desarrollo de las economías y el aumento de la población mundial, la demanda de agua se ha incrementado drásticamente. En muchas zonas áridas, los cambios climáticos han propiciado la disminución de las precipitaciones y el avance de la desertificación es cada día más evidente. El aumento de consumo y la intensificación de la aridez requieren una gestión activa del agua tanto en la cuenca como en los usos individuales.

El proyecto CAMINAR (Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America; Gestión de Cuencas con Actividad Minera en Regiones Áridas y Semiáridas en Sudamérica), como indican sus siglas, está orientado a los problemas en cuencas áridas y semiáridas de Sudamérica, lugar donde la minería se ha desarrollado desde los inicios del período colonial e incluso desde el período pre-colonial. Las actividades mineras desarrolladas con anterioridad a los años ochenta no consideraron los aspectos ambientales y sociales, principalmente por desconocimiento. Prueba de ello son los muchos pasivos ambientales que han continuado afectando el medio ambiente y la calidad de los recursos hídricos en muchas zonas rurales, generalmente habitadas por pueblos indígenas. Existe un repunte de la minería acontecido en años más recientes en estas zonas, que ha sido impulsado principalmente por grandes empresas mineras internacionales que operan bajo estrictas normas ambientales nacionales y empresariales. Sin embargo, las condiciones climáticas áridas implican que cada gota de agua tiene un enorme valor y se debe priorizar la gestión de los recursos hídricos y la minimización de los posibles impactos negativos y de los conflictos en torno al uso del agua. En la mayoría de los países se reconoce la importancia de una administración eficiente de los recursos hídricos para efectuar una distribución equitativa. La ingeniería y la tecnología han desarrollado a través de los años las herramientas para entender y gestionar los recursos hídricos. Sin embargo, estas herramientas no pueden alcanzar su cometido sin tener en cuenta las condiciones socio-económicas y la involucración de los grupos de interés en una cuenca dada.

El presente libro propone una base común para la planificación de recursos hídricos y su gestión en operaciones mineras en zonas áridas y semiáridas teniendo la cuenca y sus actores como contexto de gestión. Se ha escrito con el deseo de que pueda contribuir a la cimentación de una nueva cultura de gestión del agua en estas zonas enfocada en un uso eficiente y equitativo.





**AGUA Y MINERÍA EN CUENCAS ÁRIDAS  
Y SEMIÁRIDAS**



# 1 INTRODUCCIÓN

Los problemas asociados a la gestión del agua no son nuevos, ni están asociados a un solo país. Actualmente la gestión racional a nivel de cuenca es un problema global. Se han ensayado posibles soluciones a este problema en diferentes regiones del mundo (Loredo et al, 2008), de las que se pueden sacar conclusiones sobre lo que se debe hacer y lo que no.

Esta problemática de gestión es especialmente preocupante en las regiones áridas y semiáridas con minería, dado que la escasez del recurso lo convierte en fuente de conflictos. Hace más de cincuenta años J.F. Kennedy dijo “Quien sea capaz de resolver los problemas del agua será merecedor de dos premios Nobel, uno por la ciencia y otro por la paz”, frase de total actualidad en estas cuencas donde es necesario realizar una gestión eficaz de las disponibilidades del recurso con el fin de poder rentabilizar al máximo el uso.

La solución a los problemas de gestión en estas cuencas no es fácil ni evidente. A los problemas de cantidad debemos unir los de calidad del recurso agua. Es necesario pues, que exista una toma de conciencia a nivel general de la población del problema existente. El agua en estas regiones es un bien muy escaso que no se debe derrochar ni contaminar. Además para una correcta gestión a nivel de cuenca es necesario un conocimiento exacto de la disponibilidad del recurso y las necesidades. Dado que éstas son mayores, se hace necesaria la determinación de las prioridades de uso de manera sensata y realista, basada en datos reales y verdaderos.

El gran problema de gestión radica en las controversias que generan a nivel local las determinaciones de uso. La gestión es ante todo un problema técnico, luego socioeconómico y por último una cuestión política, aunque en muchos casos no se respeta este orden, lo que dificulta aún más hallar soluciones adecuadas.

Es importante recordar que en las regiones áridas y semiáridas el agua es el factor limitante del desarrollo económico (Loredo et al, 2008), lo que lo convierte en el recurso más preciado. Evidentemente, dado el escenario existente en estas regiones, la correcta gestión del agua a nivel de cuenca no es fácil y no se puede ni se debe improvisar. Las experiencias internacionales demuestran que de la improvisación resulta catastrófica para los usuarios y genera graves problemas económicos, especialmente en la agricultura.

Esta guía posee una orientación eminentemente técnica, y por ello presenta opciones técnicas; después de una evaluación de la experiencia internacional realizada en otro documento (Loredo et al, 2008), se ha tratado de plasmar las mejores prácticas de gestión de los recursos hídricos en las cuencas áridas y semiáridas con presencia minera.

Evidentemente por la propia extensión de la guía es imposible tratar todos los aspectos de la gestión de cuencas e impactos mineros con la extensión que necesitaría cada uno, pero se dan los conceptos necesarios para comprender adecuadamente cada uno de ellos, citándose donde se consideró necesario textos de referencia para poder profundizar en ellos. En este contexto se debe reconocer el

trabajo realizado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas, principalmente por el Dr Alex Dourejeanni (Dourejeanni A; G Dascal; y R Salgado (1999) y Dourejeanni A, (2001)

No se ha entrado a valorar los aspectos económicos, ni los políticos, por no ser el fin de la guía. Se ofrece pues una visión técnica, pero sin olvidar el aspecto social, pues todos somos usuarios del recurso, y por ello es necesario, y así lo exige una adecuada gestión del recurso, la participación de todos los grupos de interés y actores.

El problema de la gestión es de importancia mundial, y en las regiones áridas y semiáridas de relevancia capital. Una demostración de esta importancia es el hecho de que en el 2008 se celebrase en Zaragoza, en el año internacional del agua, la Exposición Internacional 2008, que ha girado exclusivamente en torno al agua y al desarrollo sostenible. En ella intervinieron numerosos expertos mundiales y como colofón se redactó un documento, la Carta del Agua de Zaragoza 2008, con una serie de recomendaciones, entre las que citamos por considerar que esta guía está enmarcada en dicha filosofía:

- A3 Que se impulse una gestión del agua participativa, eficiente y solidaria, de modo que fomente la responsabilidad individual y colectiva, mediante el desarrollo compartido de conocimientos y experiencias.
- A6 Que las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos sean la cuenca hidrográfica y el acuífero, incluso en los casos en que tengan carácter supranacional.
- B5 Que se someta al control público la gestión de los servicios públicos de agua y saneamiento.
- B6 Que se ajuste y controle la demanda de agua recurriendo al mismo tiempo a criterios educativos, informativos, participativos y tarifarios.
- B13 Que se establezcan políticas integradas para facilitar la reasignación de agua entre los diversos usos, siempre que con ello se favorezcan la eficiencia económica y la calidad ambiental.
- B14 Que los ciudadanos participen como corresponsables en la gestión integrada del agua y la sostenibilidad.
- B15 Que los ciudadanos asuman que el agua es, además de un recurso de uso humano, un patrimonio de todos los seres vivos.

Como resumen de lo que se va a desarrollar en los capítulos siguientes podríamos decir que el objetivo es lograr la gestión sostenible del agua a nivel de cuenca, de modo participativo, y la minimización de los impactos mineros como punto clave para lograr el desarrollo social, económico, cultural y ecológico de las regiones áridas y semiáridas con presencia minera, sin menoscabar el importante acervo cultural de las poblaciones indígenas que habitan en ellas.

## **1.1 Objetivo de la Guía**

El presente libro se dirige a las personas que tienen en su área de interés el uso de agua en zonas áridas y semiáridas con presencia de actividad minera. Esto incluye tanto a profesionales de la industria minera, administraciones y reguladores, como a usuarios y grupos de interés en estas zonas. El objetivo de la Guía es proponer una base común para la planificación de recursos hídricos y su gestión en operaciones mineras.

El libro, concebido como una guía, ha sido desarrollado como una continuación de las guías producidas para el proyecto ERMITE del Quinto Programa Marco de la Comisión Europea y el proyecto ERMISA del Sexto Programa Marco. ERMITE fue un estudio sobre los Reglamentos Ambientales para Aguas de Minas en los países de la Unión Europea. ERMISA estuvo orientado a la gestión de agua en la minería, enfocándose principalmente en el caso de Perú, e incluyó todas las regiones y climas del país desde zonas con abundantes lluvias aunque estacionales hasta las zonas más áridas.

La guía también ha tomado en cuenta otros documentos y guías existentes, tal como el informe final “Abriendo Brecha” del proyecto Minería, Minerales y Desarrollo Sostenible (MMSD, 2002), la guía “Water Management” del programa Mejores Prácticas Sostenibles para la Industria Minera del Gobierno de Australia (DRET, 2008), y la guía GARD (Global Acid Rock Drainage Guide, Guía de Drenaje Ácido de Roca; disponible en <http://www.gardguide.com>) de la Red Internacional para la Prevención de Ácido (INAP).

El presente libro ofrece un plan de acción o una serie de directrices generales sin entrar en detalles que se pueden encontrar en otras guías o libros de texto. El lector tendrá que adaptar estas pautas a las condiciones, legislaciones y costumbres locales.

El libro tiene tres objetivos principales:

- Promover la conservación y el uso equitativo de los recursos hídricos en las zonas áridas y semiáridas.
- Promover una gestión proactiva tanto a nivel de proyectos como a nivel de cuenca.
- Promover la protección de la calidad y el uso eficiente del agua en las operaciones mineras.

## 1.2 Enfoque de la Guía

El proyecto CAMINAR tiene un enfoque basado en las condiciones climáticas e hidrometeorológicas de las zonas áridas y semiáridas, centrándose principalmente en las condiciones de Sudamérica, con cuencas piloto ubicadas en Perú, Bolivia y Chile (Fig. 1.1). Estos países cuentan con una industria minera significativa que tiene una demanda importante de agua, lo que puede producir conflictos con los usuarios tradicionales. Aun siendo muy importante para las economías nacionales, la minería tiene que existir en convivencia con el resto de usuarios de los recursos hídricos y las culturas relevantes en estas zonas (Fig. 1.2).

El libro está orientado hacia la planificación eficiente y equitativa en la gestión de los recursos hídricos en estas cuencas y en particular la gestión del agua y los residuos dentro de las operaciones mineras como herramienta para facilitar la minimización de conflictos de uso.

Existen factores especiales de la gestión en zonas áridas y semiáridas, entre ellos son:

1. Precipitación infrecuente pero a veces torrencial
  - a) Producción de sedimentos gruesos
  - b) Baja generación de aguas ácidas, pero acumulación de sales y metales por falta de medio de transporte
2. Altas tasas de evaporación
  - a) Escorrentía se evapora rápidamente



- b) Altas tasas de infiltración en los sedimentos gruesos
- c) Pocas posibilidades de mantener reservas de agua en la superficie por las pérdidas de evaporación
- d) Más uso de aguas subterráneas

3. Falta de vegetación para

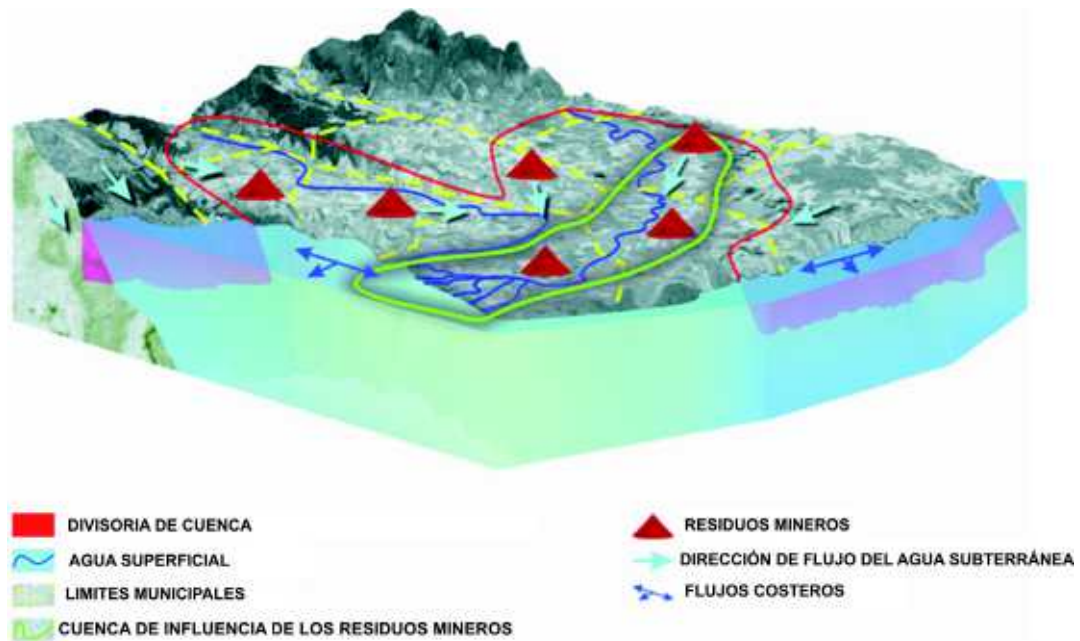
- a) retener la escorrentía
- b) estabilizar la superficie, resultando en altos niveles de erosión
- c) dificultad de construir coberturas estables sobre botaderos
- d) levantamiento de polvo por los vientos y contaminación atmosférica por material particulado (PM-10)



*Figura 1.1 Área del Proyecto CAMINAR*

Aunque los tres países considerados e involucrados en el desarrollo del proyecto CAMINAR tienen algunas características en común, también existen diferencias considerables entre ellos de índole cultural, económica y administrativa. Se ha tratado de mantener una orientación técnica basada en las mejores prácticas de gestión (Best Management Practice) en la preparación de éste libro, pensando que cada usuario debe adaptar las ideas propuestas aquí a las circunstancias relevantes de su país o región. Los principios descritos en el mismo también pueden aplicarse en otras regiones áridas con minería.

Después de una introducción a las fuentes de agua en zonas áridas y semiáridas, el libro se ha dividido en cuatro capítulos o secciones. El primer capítulo (Cap. 2), está dedicado a la planificación del agua en operaciones mineras dentro del contexto de una cuenca. El Segundo (Cap. 3), está dedicado a la gestión de del agua en las operaciones mineras de mediana y gran escala. El Tercero (Cap. 4), se ha dedicado a la gestión del agua en la minería artesanal y a pequeña escala, así como a la evaluación de los impactos que genera sobre el medio hídrico. Y por último el cuarto (Cap. 5) se ha dedicado a la gestión de los pasivos ambientales mineros y a las técnicas de tratamiento por medios pasivos de aguas ácidas y remediación de suelos.



*Figura 1.2 Gestión Integrada de Agua a Nivel de Cuenca*

## 1.3 EL AGUA EN LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMI ÁRIDAS

### 1.3.1 Aguas Superficiales

#### 1.3.1.1 Bofedales o Turberas

**Características:** Los bofedales son formaciones vegetales herbáceas siempre verdes que se forman en sectores del altiplano, bajo condiciones de saturación por niveles de aguas subterráneas altos y/o escorrentía superficial permanente. Estos humedales son zonas de forraje y abrevadero de especies amenazadas (vicuña, guanaco, llama y alpaca entre otros). Las vegas están asociadas a zonas sin escorrentía superficial permanente en las cuales los niveles freáticos en forma natural se encuentran alejadas de la superficie. En Bolivia toda la cuenca del Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa corresponde a uno de los humedales más importantes del altiplano, ocupa alrededor de 102.340 hectáreas. En este área habitan miles de grupos comunitarios que viven de sus aguas, usadas tanto para el riego como para la ganadería, existe además una diversidad importante de fauna y flora, además de los usos industriales.



*Figura 1.3 Bofedal en el altiplano*

Las condiciones hidrológicas son extremadamente importantes para el mantenimiento estructural y funcional del humedal. Las condiciones hidrológicas afectan factores abióticos, como anaerobiosis de suelos, disposición de nutrientes y salinidad. Estos factores determinan la flora y fauna que se desarrollará en ellos. El periodo hídrico es el resultado de la entrada y salida del agua, en el que pueden presentar cambios dramáticos de acuerdo a la estación y a las variaciones anuales (Mitsch y Gosselink 1993)

**Importancia ambiental:** Los humedales son áreas de transición entre ecosistemas acuáticos o terrestres. En términos de ordenación geográfica, son de transición, porque usualmente se encuentran entre tierras altas y sistemas acuáticos y también debido a la cantidad de agua que almacenan y procesan (Mitsch y Gosselink 1993).

Además, son ecosistemas muy importantes tanto para animales y plantas acuáticas y terrestres. Es por esta razón, que cualquier cambio en su hidrología puede ocasionar cambios bióticos significativos. Las condiciones hidrológicas pueden modificar o cambiar propiedades físicas, químicas como la disposición de nutrientes, salinidad del suelo, propiedades de sedimentos, pH y el grado de anoxia del substrato del suelo. Sin embargo, existe también un control biótico dentro de lo que es la hidrología de un humedal. La vegetación y algunos animales pueden controlar las condiciones del agua a través de mecanismos como la acumulación de turba, trampas de sedimentos, retención de nutrientes, sombra y transpiración (Mitsch y Gosselink 1993).

En Chile el Código de Aguas fue modificado en 1992 incorporando a los artículos 58 y 63 la protección y conservación de los humedales del altiplano de las regiones de Tarapacá y Antofagasta, mediante la prohibición de explotar y explorar los recursos subterráneos. De esta manera, en las regiones en el norte de Chile quedaron protegidos un total de 306 humedales, con una superficie de 3133 km<sup>2</sup>.

En cuanto a la exploración de aguas subterráneas, estos acuíferos quedan protegidos en el sentido

que no se podrán efectuar exploraciones en terrenos públicos o privados de zonas que alimenten vegas y bofedales sino con autorización fundada de la Dirección General de Aguas.

**Importancia social y económica:** Los humedales son un factor importante social, cultural, ambiental y económico, ya que constituyen el sustento para las comunidades altiplánicas aymará, quechua y atacameña. Estos proporcionan vegetación a sus animales la cual constituye la fuente nutricional y de agua.

### ***1.3.1.2 Salares***

**Características:** El altiplano de Bolivia y Chile se caracteriza por la existencia de cuencas cerradas o endorreicas, dentro de las cuales se han formado lagunas situadas entre los diferentes cordones que forman la Cordillera de los Andes. Con la extrema tasa de evaporación que existe en estas zonas, el agua se ha parcial o totalmente evaporado dejando extensiones planas importantes de sales o agua salada. Se cuentan centenares de salares, de todos los tamaños en Bolivia, Chile y en Argentina. Estos salares tienen composiciones químicas complejas y variadas y contienen elementos y sales, tales como el boro, el potasio, el litio, el carbonato de sodio, etc.

El salar de Uyuni en el suroeste de Bolivia es, con sus 12.000 km<sup>2</sup>, el mayor desierto de sal del mundo. Está situado a unos 3.650 metros de altura. El salar de Coipasa es el segundo en términos de área (2.218 km<sup>2</sup>) y se encuentra localizado entre Bolivia y Chile, principalmente en el Departamento de Oruro. Presenta un espesor máximo de 100 metros en capas superpuestas de 1 a 2 metros de espesor. Las rocas que rodean el salar son principalmente volcánicas incluyendo afloramientos esporádicos de rocas sedimentarias al oeste del salar.



***Figura 1.4 Salar en el Altiplano***

**Importancia Ambiental:** La importancia ambiental de los salares está principalmente en su fauna y flora adaptada para sobrevivir en condiciones de extrema salinidad. Los flamencos son las aves más típicas que habitan estas áreas.

**Importancia social y económica:** Existen numerosos salares en el norte de Chile, con uno de los mayores, el Salar de Atacama explotado por las sales y minerales de cloruro de potasio, sulfato de potasio, ácido bórico y sales de litio. Este salar, ubicado al sur del pueblo de San Pedro de Atacama tiene una gran extensión con lagunas de agua en una área protegida - Reserva Nacional Los Flamencos, en el norte, una de las atracciones turísticas más importantes de Chile, y las operaciones mineras en el sur que constituyen la producción de minerales no metálicos más grande en el mundo.

En el Salar de Uyuni existen la explotación de sal (cloruro de sodio) y litio con una expansión importante de exploración, dado que el salar cuenta con alrededor de 40% de las reservas mundiales de litio, metal importante en el desarrollo de baterías para el creciente desarrollo de vehículos eléctricos.

La situación del Salar de Atacama y del Salar de Uyuni demuestra bien las diferentes demandas potencialmente conflictivas entre el medio ambiente y sus ecosistemas sensibles, las comunidades y la industria minera no metálica para el agua en esta región árida.

### 1.3.2 Aguas Subterráneas

**Características:** Los materiales naturales de la tierra tienen una muy amplia gama de conductividades hidráulicas. Cerca de la superficie terrestre son muy pocas, por no decir ninguna, las formaciones geológicas que son absolutamente impermeables. La erosión, el fracturación y las disoluciones han afectado en mayor o menor grado la mayor parte de las rocas. Sin embargo, el rango de movimiento de agua subterránea puede ser sumamente lento en las unidades de baja conductividad hidráulica.

Un acuífero es una unidad geológica que puede almacenar y transmitir agua en rangos bastantes rápidos para suministrar agua a pozos en cantidades razonables. La permeabilidad intrínseca de los acuíferos se extendería de aproximadamente  $10^{-2}$  darcy hacia valores más altos. Las Arenas no consolidadas, las gravas, areniscas, calizas y dolomías, flujos de basalto, rocas metamórficas y plutónicas fracturadas son los ejemplos de rocas aptas para ser acuíferos.

Una capa confinante es una unidad geológica que tiene poca o ninguna permeabilidad intrínseca, menos de aproximadamente  $10^{-2}$  darcy. Este límite algo arbitrario depende de las condiciones locales. En las áreas de arcilla con permeabilidades intrínsecas de  $10^{-4}$  darcy, limos con  $10^{-2}$  darcy pueden ser usados para suministrar agua a un pozo pequeño. Por otra parte, el mismo limo podría ser considerado como una capa confinante si es encontrada en un área con gruesas gravas con permeabilidades intrínsecas de 100 darcys. El agua subterránea se mueve a través de muchas capas confinadas, aunque la velocidad de movimiento sea bastante lenta.

Los acuíferos confinados son muchas veces subdivididos en acuitardos, acuicludos y acuífugos.

**Importancia ambiental:** la importancia ambiental de los acuíferos se refiere directamente al hecho

de que las aguas subterráneas son parte esencial del ciclo hidrológico entre la tierra y la atmósfera. Como se trata de un recurso ampliamente utilizado en todas las regiones del mundo y es por ello que deben ser protegidos de la sobreexplotación o el uso indebido de los mismos. El agua subterránea descarga a la superficie a través de manantiales y también como evapotranspiración de los acuíferos situados cerca de la superficie. Las descargas son importantes para mantener los ecosistemas sensibles sobre los cuales la población local se ha desarrollado desde tiempos prehistóricos.

**Importancia social y económica:** La importancia de las aguas subterráneas, tanto para el abastecimiento público como para el privado, es incuestionable. En el continente iberoamericano, se estima que en 1987 más de 100 millones de personas utilizaban este recurso. El número que crece cada día, como consecuencia de la rápida urbanización y de la expansión económica que experimentan los países de la Región, así como de las relativas ventajas que presenta el uso de este recurso con relación al de las aguas superficiales. Es por eso que los recursos hídricos subterráneos deben ser considerados hoy de carácter estratégico y de muy elevado valor socioeconómico para el desarrollo sostenible y deben constituir patrimonio de toda Nación. En el norte de Chile existen varias comunidades rurales dependientes del agua subterránea, y también algunas minas de cobre de gran escala.

La importancia de las aguas subterráneas no fue reconocida hasta las últimas décadas y aunque en los últimos años las empresas mineras han realizado numerosos estudios del recurso subterráneo, los datos no se encuentran disponibles al público o investigadores independientes.

Existen argumentos técnicos respecto al grado de recarga de los acuíferos (Houston 2007), con algunos autores indicando que la recarga es mínima y las aguas de los acuíferos son fósiles, mientras otros investigadores mantienen que la recarga desde las cotas más altas es evidenciada por los gradientes hidráulicos y las pérdidas por evaporación que no se reflejan en una bajada permanente de los niveles freáticos. Otra área en la que falta investigación es el grado de interconectividad entre cuencas y la transferencia inter-cuenca de aguas subterráneas.

### 1.3.3 Glaciares

**Características:** Un glaciar es una masa de hielo que posee un espesor considerable y que se ha originado en la superficie terrestre por compactación y recristalización de la nieve. Su existencia es posible debido a que la precipitación anual de nieve supera la que ha sufrido el deshielo estival, por lo cual la mayoría se encuentra en zonas cercanas al polo Sur o en las cadenas montañosas de los Andes (Erickson, 1996).

A nivel mundial un 10% de la Tierra está cubierto de glaciares, que almacenan unos 33 millones de km<sup>3</sup> de agua dulce.

**Importancia ambiental:** la importancia ambiental de los glaciares se refiere directamente al hecho de que el parcial deshielo anual de los glaciares representa un elemento importante en el ciclo hidrológico en las zonas áridas y semi áridas de Perú y Chile por el constante flujo de agua que producen durante los meses de primavera y verano que permite que los sistemas de riego tengan agua.

En el norte de Chile y en Perú, la línea de nieve se sitúa sobre los 6000 m.s.n.m y son pocos los glaciares debido a la escasez de lluvias. Los glaciares o acumulaciones semi permanentes de nieve que existen presentan pequeñas dimensiones, pero en conjunto con los glaciares rocosos tienen im-

portancia por mantener un caudal en los ríos en las zonas áridas.

Las aguas provenientes del deshielo son parte esencial del ciclo hidrológico y se trata de un recurso ampliamente utilizado en las regiones andinas y es por ello que deben ser protegidos. Estos caudales son importantes para mantener los ecosistemas sensibles muy dependientes de las aguas de deshielo para su supervivencia.

**Importancia social y económica:** Se estima que en la zona de los Andes se ha reducido en un cuarto el área ocupada por los glaciares en la última treintena de años, y que los glaciares de menor tamaño habrán desaparecido completamente en el 2020, afectando gravemente a ciudades como La Paz y Lima, y a más del 40% de la agricultura de los valles andinos que dependen para el riego del agua proveniente del deshielo de los glaciares. Diversos estudios avisan de que un incremento en la temperatura de solo un 1° a nivel global tendrá un gran impacto en los glaciares de los Andes, pudiendo llegar a afectar a más de 50 millones de personas como consecuencia de la disminución de agua proveniente del aporte de los glaciares (Stern,2006). A esta situación debemos sumar la dependencia hídrica que tienen para el abastecimiento las capitales de Perú y Chile de cuencas glaciares.



*Figura 1.5 Glaciar en la Cordillera Montañosa Boliviana*



**LA PLANIFICACIÓN DEL AGUA EN  
OPERACIONES MINERAS EN EL  
CONTEXTO DE UNA CUENCA**





## 2 PLANIFICACIÓN DEL AGUA EN OPERACIONES MINERAS EN EL CONTEXTO DE UNA CUENCA

### 2.1 Gestión de Recursos Hídricos

En la literatura convencional sobre temas relacionados con actividades de gestión dentro del ámbito de una cuenca hidrográfica es frecuente que no se haga mayor distinción entre gestión de agua o de cuenca y manejo de cuenca. La carencia de identificación de las acciones que recaen bajo estos dos procesos diferentes origina una confusión en los roles que se asignan a las instituciones encargadas de ejecutarlos. En idioma inglés existe la diferenciación entre watershed o catchment y river basin. En el idioma español esta diferenciación no existe, sólo se hace referencia a Cuenca hidrográfica o de modo simplificado cuenca.

La gestión de cuenca o de agua dentro del ámbito de una cuenca, o cuencas interconectadas se centra casi exclusivamente en captar, regular, controlar, aprovechar y tratar dicho recurso haciendo uso de obras hidráulicas auxiliares. Las instituciones que tiene a su cargo gestionar y utilizar de la manera más racional posible el agua tienen una gran tradición en los países de la región sudamericana. Sus objetivos normalmente son realizar el balance entre la oferta y la demanda de agua, así como controlar o mitigar efectos extremos con que se presenta el agua en épocas de sequía o inundaciones. Más recientemente, el tema de contaminación del agua, el drenaje urbano, y la estabilización de las zonas que son fuente de riesgo o de deslizamiento también ha pasado a ser parte de la preocupación de los gestores del agua (Dourojeanni, 2001).

En estas acciones normalmente las cuencas están orientadas sólo como captadoras de agua y se realizan vía proyectos de inversión. La participación de los usuarios en las decisiones no se han considerado importantes tradicionalmente para el diseño de obras ni para su administración (Vargas, 2004). La gestión del agua era y aun es un área de trabajo tradicionalmente dominada por la ingeniería hidráulica con sus múltiples variantes formativas ligadas a la construcción, la hidrología superficial o subterránea, así como otras ramas de la ingeniería afines y otras especialidades complementarias como la economía y el derecho. El avance conceptual y práctico de los especialistas en estas áreas los ha llevado recientemente a ampliar su forma de actuar, primero de un enfoque de uso sectorial a uno de enfoque multisectorial y actualmente a la gestión integrada del recurso y con este último involucrar aspectos ambientales y de equidad, en lo que se a dado en llamar gestión integral del agua.

El manejo de cuencas tienen como fin acondicionar o “manejar” la superficie y la subsuperficie de la cuenca que capta el agua. El conjunto de acciones que conforman un proyecto de acondicionamiento de cuencas (no existe un proyecto de manejo de cuencas sino un conjunto de acciones, cluster o proyectos que sumados dan un efecto de acondicionamiento o “manejo”) tiene como objetivo usual manipular la superficie de captación para regular la escorrentía. En todos los casos estos objetivos se orientan a usar la cuenca como captadora (“catchment area”) de agua para diferentes fines. Las técnicas eran vinculadas a al gestión forestal, gestión de pastos, gestión de nieve, control de frea-tofitas y en general todo lo que permitía tener cierto control sobre la escorrentía (Dourojeanni et al, 2002). Con el acondicionamiento de una cuenca se busca retardar la escorrentía con lo cual se controlaba también la erosión de suelos. Sin embargo, las técnicas de manejo de cuencas pueden aplicarse para cualquier objetivo vinculado a obtener efectos deseados sobre la descarga de agua, su

calidad y el tiempo o momento en que ocurre, y para reducir el impacto de la escorrentía protegiendo así zonas vulnerables cerca de pendientes o cauces. Dado que las técnicas de manejo de cuencas se aplican a cuencas relativamente pequeñas, es que se hace referencia a cuencas de montaña, cuencas de cabecera, microcuencas, sub cuencas y otras denominaciones para referirse a programas de manejo de cuencas.

Tal como puede deducirse de los párrafos anteriores, la gestión de cuenca o de agua por cuencas y el manejo o acondicionamiento de cuencas son dos actividades complementarias que tienen forzosamente áreas comunes de acción pero que institucionalmente operan bajo esquemas diferentes. Las actividades de gestión de agua se realizan sobre un esquema de entidad de cuenca (entidades, agencias, mesas, autoridades o consejos de cuencas). Las de acondicionamiento o “manejo” de cuencas normalmente están bajo los auspicios de programas de medio ambiente (Dourojeanni et al, 2002).

En la mayoría de los países se reconoce la importancia de una administración eficiente de los recursos hídricos para efectuar una distribución equitativa. Debido a las presiones sociales y el aumento en la demanda por el agua en los últimos años, en los países de América Latina se han empezado en forma tentativa la formación de entidades o foros de gestión de cuencas en Chile y Perú. En Bolivia la gestión de agua, especialmente en los sectores del altiplano, se realiza a través del sistema de municipios y consejos tradicionales de comunidades.

En Perú la Ley de Recursos Hídricos N° 29338 fue promulgado el 23 de marzo 2009, bajo la cual se formó la Autoridad Nacional de Agua (ANA) que tiene como uno de sus facultades la gestión de cuencas hidrográficas. Así, en Perú la gestión de agua se ha formalizado y se espera la formación de entidades individuales de gestión de cuenca. En setiembre de 2009, la ANA publicó un proyecto de Reglamento de la Ley 29338.

En Chile, la Estrategia Nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas (ENGICH) fue originalmente promocionada por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) en el año 2006 como una política pública que busca generar las condiciones para que la gestión de los recursos hídricos y naturales sea integrada y sustentable, tanto para el medio ambiente como para las actividades productivas.

Los objetivos de la ENGICH son:

- Desarrollar una institucionalidad que de gestión de cuencas hidrográficas. Promover el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos y otros recursos relacionados, para hacerlo más sustentable.
- Mejora la eficiencia en el aprovechamiento del agua y reducir las presiones de los sectores productivos, con relación a la calidad y la cantidad del recurso hídrico, en zonas de mayor criticidad.
- Proveer aportes para maximizar el bienestar económico y social, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.
- Avanzar en la incorporación de consideraciones ambientales en la gestión del recurso hídrico, estableciendo las bases para la aplicación de caudales mínimos ecológicos e indicadores biológicos sobre la calidad del agua, entre otros.
- Involucrar a la sociedad y usuarios a través de una mayor consideración en la toma de decisiones fortaleciendo el rol de los usuarios de la cuenca, a través de la generación de condiciones que permitan canalizar sus demandas.
- Mejorar la base de información y conocimiento sobre el manejo del agua, así como el cono-

cimiento de las relaciones y dinámicas de los ecosistemas.

Otra ejemplo de gestión de cuencas en Chile son las Mesas de Agua, creadas como prototipo de un Organismo de Cuenca. Su origen fue una iniciativa entre privados (agricultores y mineros en el Valle de Copiapo), ayudado por los ONG como CAZALAC. Tomando cuenta de la necesidad de una mejor coordinación y gestión de agua en las zonas de mayor escasez, el Ministerio de Obras Públicas a través de la DGA está promocionando la creación de Mesas de Agua como la única instancia de participación pública y privada para identificar las necesidades y problemáticas territoriales derivadas del uso del agua y los intereses del medio ambiente.

Hasta el momento en los países de Sudamérica el avance es hacia una gestión de los recursos hídricos a través de diálogo entre los usuarios. Aunque hay reconocimiento de la necesidad de una gestión más integral de todos los componentes de una cuenca por el momento no existe el apoyo administrativo / político.

La ingeniería y la tecnología han desarrollado a través de los años las herramientas para entender y analizar los recursos hídricos. Sin embargo, estos análisis técnicos han de integrarse en un proceso de planificación integral que tenga en cuenta las realidades socio-económicas y el contexto político de una determinada cuenca. El resultado tangible de este proceso debería ser un plan coherente para la gestión del recurso.

Un plan es un instrumento dinámico sujeto a modificaciones en sus componentes en función de la evaluación periódica de sus resultados (Vidales, 2003).

Esta definición de plan implica que es un instrumento que tiene componentes, y que sus resultados deben ser evaluados periódicamente. Un Plan de Gestión de Agua incluye componentes básicos como:

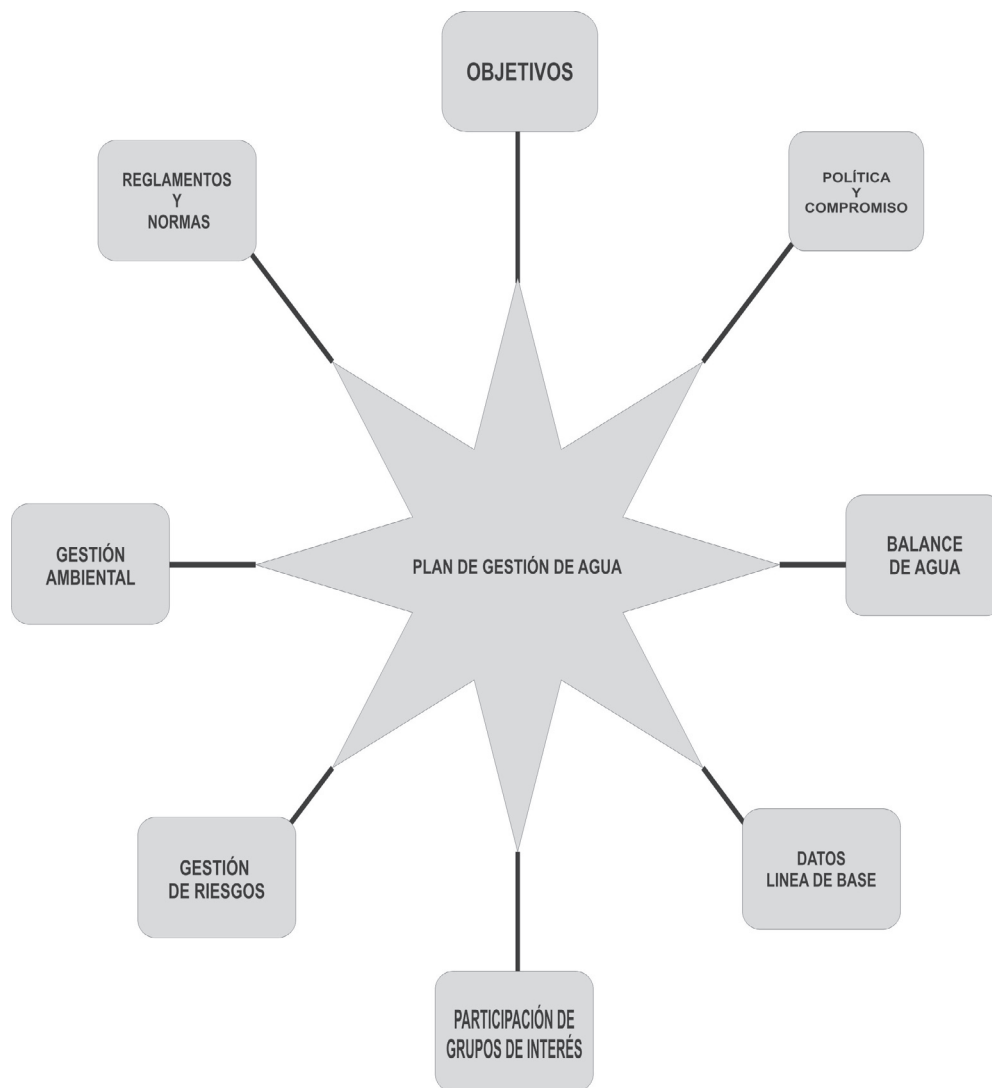
- Datos (meteorológicos, hidrológicos, hidroquímicos, consumo, etc.)
- Análisis de los datos
- Aspectos socio-económicos (uso de suelo, actividades económicas, etc.)
- Aspectos legales (derechos de agua, propiedad de los terrenos etc.)

Todos estos componentes están sujetos a cambios, algunos de un día a otro como el clima, y otros a cambios casi imperceptibles, pero todos necesitan de una observación y monitorización periódica. En términos de uso, también hay cambios, tales como un aumento o disminución de la población, variaciones de demanda de agua, cambios en los procesos que usan el agua, etc. Por lo tanto, la situación del Plan es dinámica y las decisiones tomadas en un momento deben modificarse de acuerdo con los cambios que van ocurriendo.

Sin un Plan de Gestión dinámico y actualizado, no es posible tener una gestión adecuada y eficiente de los recursos hídricos, ni en el ámbito de una planta industrial o minera, ni al nivel de cuenca, ni a nivel de usuario.

## **2.2 Componentes de un Plan de Gestión de Agua**

Un Plan de Gestión debe contener varios aspectos indispensables, como por ejemplo la estrategia y los objetivos del Plan, los programas para alcanzar los objetivos y los resultados esperados de la gestión de agua, y las comprobaciones (monitorización y auditoría) para confirmar el progreso hacia los objetivos. En la Figura 2.1 se indican los componentes más importantes del Plan de Gestión, y a continuación algunas sugerencias respecto a cada componente.



*Figura 2.1 Componentes de un Plan de Gestión de Agua*

### 2.2.1 Objetivos Estratégicos del Plan de Gestión.

Uno de los primeros pasos en la preparación del Plan de Gestión de los recursos hídricos, sea para una cuenca, subcuenca o una operación industrial o minera, es la formulación de los objetivos estratégicos del Plan, los programas a realizar y los resultados esperados. El objetivo principal de los Planes de Gestión de Agua (PGA) y los Sistemas de Evaluación de Impactos Ambiental (EIA) es minimizar los impactos negativos tanto ambientales como económicos y culturales, y maximizar los impactos positivos.

Esta estrategia debe ser programada bajo cuatro puntos:

- Mejorar la gestión de uso del agua para conservar su cantidad y calidad.
- Valorar el agua, para que el recurso este bien gestionado.
- Comprometerse a un buen trato con otros usuarios. El agua es un bien compartido.
- Agregar valor a un producto por el uso de agua, y no disminuir el valor de la misma.

Los elementos fundamentales para formular una estrategia de gestión del agua se muestran en la siguiente Figura 2.2.



Figura 2.2 Marco Estratégico de la Gestión del Agua. Modificado de Río Tinto

## 2.2.2 Política y Compromiso

Las políticas corporativas del proponente de un proyecto deben cumplir con un serie de políticas internacionales (en el caso de empresas multinacionales) y nacionales que controlan las actividades del proyecto para que sus impactos no dañen o perjudiquen ni a otras personas ni al medio ambiente.

Cualquier proyecto que busque financiación de entidades internacionales debe demostrar que posee una política que se adhiere a los Principios de Ecuador<sup>1</sup>, desarrollados inicialmente por cuatro bancos del sector privado en colaboración con la Corporación Internacional de Financiación (IFC) del Banco Mundial, y adoptados por un total de 68 bancos en Agosto 2009. Estos Principios se basan en los estándares sobre sostenibilidad social y ambiental de la IFC y las guías sobre el Medio Ambiente, Salud y Seguridad del Banco Mundial. Su propósito es asegurar que los proyectos financiados por estas entidades se desarrollan usando prácticas socialmente responsables y con una correcta gestión ambiental.

**Tabla 2.1 Resumen de Políticas y Compromisos**

POLITICAS	RESUMEN
Internacionales	Los 10 Principios de Ecuador – Banco Mundial / Corporación Internacional de Financiación Los 10 Principios del Consejo Internacional de Metalurgia y Minería (ICMM) Iniciativa Global de Información (Global Reporting Initiative - GRI) La Convención 169 de la OIT sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas
Nacionales	La Constitución Nacional Políticas específicas respecto a los Recursos Hídricos Políticas específicas respecto al fomento de la Económica y la Minería
Corporativas	Compromiso de la Gerencia con respecto a la Sostenibilidad de la Operación Compromiso de Comunicación, Cooperación y Conservación
Compromiso de todos	El compromiso de todos los interesados por acciones responsables y por mantener el diálogo

Los principales bancos privados que financian proyectos de gran envergadura también requieren que los proponentes de proyectos sigan estos Principios.

De naturaleza similar, pero orientados específicamente hacia los proyectos mineros, son los 10 Principios del Consejo Internacional de Metalurgia y Minería (ICMM, por sus siglas en inglés).

<sup>1</sup> [www.equator-principles.com](http://www.equator-principles.com)

Las guías de la Iniciativa Global de Información (Global Reporting Initiative<sup>2</sup> -GRI) sobre la Elaboración de Memorias de Sostenibilidad son de uso voluntario para las organizaciones que deseen informar sobre los aspectos económicos, ambientales y sociales de sus actividades, productos y servicios. Su objetivo es el de apoyar a las organizaciones y a las partes interesadas en la articulación y comprensión de las contribuciones de estas organizaciones al desarrollo sostenible. La gestión del agua es uno de los componentes obligatorios en las memorias escritas siguiendo estas guías.

De importancia en los países con pueblos originarios es la Convención 169 de la Organización Internacional de Trabajo (OIT) ya ratificada por Perú y Bolivia y con vigencia en Chile desde el 15 de Septiembre 2009<sup>3</sup> (ver sección 2.3.3).

Las políticas nacionales respecto al agua son desarrolladas dentro de la Constitución de cada país, las Leyes, sus Reglamentos y los Decretos.

### 2.2.3 Datos de Línea Base

Los datos ambientales son fundamentales para el Plan de Gestión porque forman la base de información para medir las variaciones que ocurren durante la vida del proyecto, sean variaciones vinculadas con la gestión ambiental del proyecto u ocasionadas por eventos exteriores.

**Tabla 2.2 Datos de Línea Base**

CATEGORÍA	DATOS
Meteorológicos	Precipitación; temperatura; evaporación potencial; vientos
Hidrológicos	Caudales
Hidrogeológicos	Porosidad; coeficiente de almacenamiento; permeabilidad; transmisividad
Glaciarismo	Volumen de hielo, área ocupada, pérdidas de hielo, caudales de deshielo;
Hidroquímicos	Análisis físicos (temperatura, sólidos en suspensión), análisis químicos (pH, metales totales, metales disueltos)
Suelos e infiltración	Porosidad; permeabilidad; transmisividad
Biológicos – Vegetación, Fauna	Especies; cobertura, población etc.
Uso de suelos	Agricultura – cultivos, pastoreo; forestal; urbano; recreativo; sin uso

2 [www.globalreporting.org](http://www.globalreporting.org)

3 [www.ilo.org/global/lang-es/index.htm](http://www.ilo.org/global/lang-es/index.htm)



Los datos de la Línea de Base son los datos obtenidos antes del comienzo del proyecto. Estos datos son recogidos habitualmente durante el EIA. Es fundamental que la monitorización de las variables continúe durante la operación y durante el período post-cierre hasta que las condiciones iniciales sean recuperadas o estén cerca de los niveles previos al proyecto.

### 2.2.4 Balance de Agua

En las zonas áridas y semiáridas, el suministro de agua es uno de los mayores problemas para que un proyecto minero o cualquier proyecto que tenga una alta demanda de agua sea viable. Es importante conocer la cantidad de agua disponible para la operación minera, por un lado para asegurar la producción (reducción de riesgos operacionales), por otro lado para evitar conflictos con otros usuarios y grupos de interés (reducción de riesgos estratégicos, a terceros y al medio ambiente). Es indispensable conocer los balances de agua tanto de la operación prevista, como de la cuenca en la que se ubica.

El balance de agua es la relación entre el agua que entra y el agua que sale de un área definida (Figura 2.3), sea el límite del área de operación de una mina, la planta concentradora, otro componente, o toda la cuenca (Figura 1.2). Si la entrada de agua es mayor que la salida de agua, aumenta el volumen almacenado; si la entrada de agua es menor que la salida, el volumen almacenado disminuirá.

$$\Delta \text{ volumen almacenado} = \text{agua entrando} - \text{agua saliendo}$$

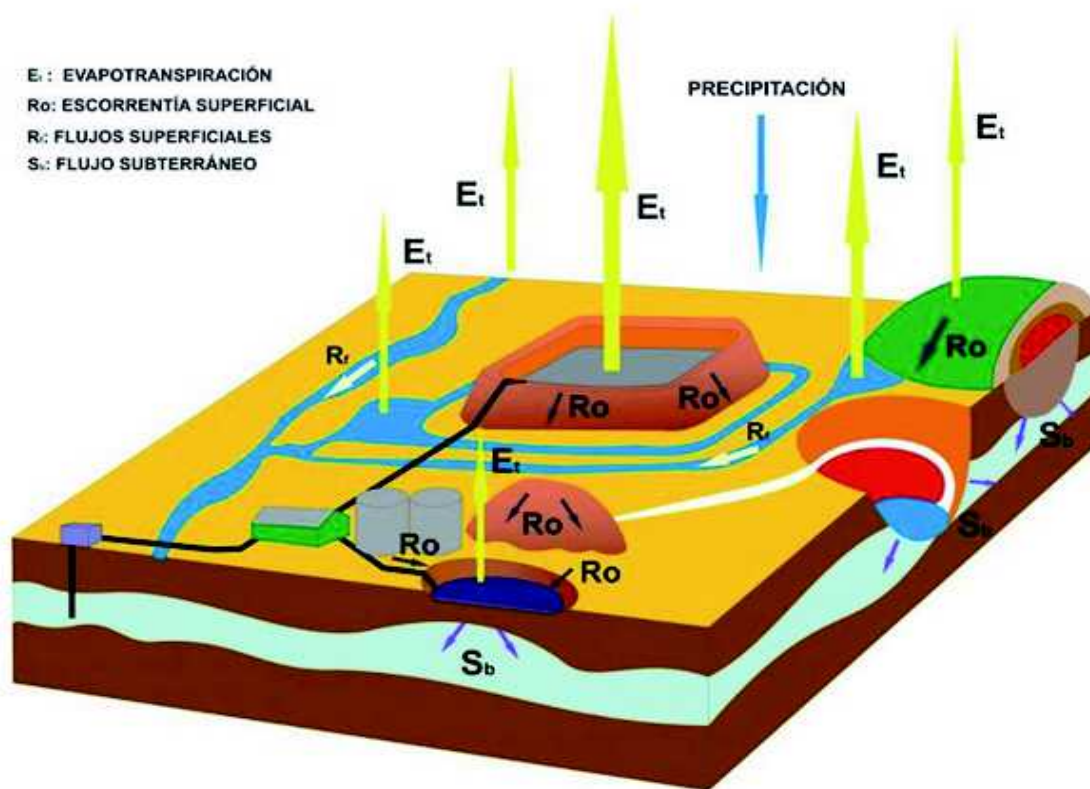


Figura 2.3 Esquema Simplificado de Flujos de Agua en una Cuenca Minera (Modificado de McQuade y Riley, 1996)

Para el balance de agua de una cuenca hay que tener en cuenta los siguientes componentes (para mayores detalles, ver por ejemplo Custodio y Llamas, 1996, o Pulido, 2007.)

- Precipitaciones: lluvia; nieve; granizo; condensaciones.
- Aporte de aguas subterráneas desde o hacia cuencas hidrográficas colindantes (los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de las divisorias de aguas superficiales).
- Traslado de agua desde otras cuencas.
- Evapotranspiración de bosques y áreas cultivadas.
- Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.
- Escorrentía superficial.
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos.
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas.
- Abstracciones para consumo humano o la industria.
- Salida de la cuenca, hacia un receptor o hacia el mar.

## **2.2.5 Participación de los Grupos de Interés**

Para que funcione un Plan de Gestión de Agua debe existir un acuerdo entre todos los actores (grupos de interés). Se trata de un paso importante dado que se debe impulsar una gestión del agua participativa, eficiente y solidaria que fomente la responsabilidad individual y colectiva, mediante el desarrollo compartido de conocimiento y experiencias. Estos foros de discusión dentro de la cuenca, que es el elemento natural de gestión, pueden ser foros formales o informales, pero son un elemento articulador para una gestión eficiente del recurso (ver sección 2.4.2). También es necesario tener en cuenta las disputas legales y su resolución dentro del sistema legal de cada país, dado que son un indicador de los posibles conflictos que deberán ser abordados en los foros de debate, buscando las medidas adecuadas, buscando la concertación entre actores para evitar litigios en los tribunales.

### **2.2.5.1 Expectativas de la Comunidad**

La irrupción de un proyecto industrial o minero en una zona puede tener impactos importantes para las comunidades que viven en la zona. Frecuentemente en los países semiáridos de Sudamérica los proyectos mineros se encuentran ubicados en áreas aisladas, con economías primarias y una infraestructura básica sin mucha capacidad de acoger nuevas actividades (usualmente economías agrarias). Algunos impactos pueden ser positivos y presentan oportunidades, pero por otro lado pueden aparecer impactos no tan beneficiosos que son considerados impactos negativos o que amenazan cambiar la cultura de los pueblos.

En un principio, igual que sucede con los datos para analizar las características físicas, químicas y biológicas del área o cuenca, es necesario tener los datos sociales y económicos para analizar el factor humano del área. Los métodos usualmente utilizados para el estudio de las condiciones socioeconómicas de un área involucran:

- Una revisión documental de censos y/o anuarios estadísticos respecto a la población, vivienda y hogares.
- Una caracterización socioeconómica en terreno, apoyada sobre la base de encuestas y observación directa, talleres de participación, entre otras actividades.

Un aspecto importante en el momento de evaluar las características socioeconómicas de un área es determinar la vocación productiva y las expectativas de la población, a fin de determinar los puntos de encuentro entre el proyecto minero y el desarrollo de la población.

Para un inversor, planificador regional o encargado de la Gestión de Cuenca, es fundamental saber cuáles son las expectativas y puntos de vista de las comunidades dentro de la zona para tener claro las perspectivas de los habitantes, sus necesidades y su visión del futuro. La participación de la población en el diseño de un Plan de Gestión de Agua también es un ingrediente vital.

Organizaciones financieras adscritas a los Principios de Ecuador requerirán para todos los proyectos con impacto una Evaluación Social y Ambiental previa y exhaustiva que cumpla al menos con los estándares del IFC y del Banco Mundial, si no existe legislación local más exigente. Estos cubren, entre otros, cuestiones como la salud y seguridad de comunidades, las adquisiciones de tierra y desplazamientos involuntarios, los derechos de las poblaciones indígenas y la herencia cultural. El Principio 5 requiere que se consulte previamente de forma estructurada y culturalmente apropiada a todas las comunidades afectadas. El proceso de consulta debe documentarse de una forma accesible para personas sin educación técnica. La involucración de las comunidades afectadas debe continuar durante la construcción y operación de las instalaciones.

**Tabla 2.3 Relaciones Comunitarias**

CATEGORIA	DATOS
Población	Número de personas; viviendas
Actividades económicas	Agricultura; industria – uso de agua; importancia económica
Actividades culturales	Terrenos protegidos; terrenos con importancia cultural/religiosa
Foros de encuentros	Oportunidades para el intercambio de ideas y preocupaciones con respecto a la disponibilidad, pertenencia y uso del agua

Para la población el tema del agua tiene visiones muy diversas. Las preocupaciones van desde la necesidad básica de tener agua para beber y usos domésticos hasta tener el agua suficiente para mantener una atracción turística que sustente el empleo y las inversiones en una zona sin otras opciones económicas. Aparte, si pueblos originarios están presentes en la zona hay que entender y tener en cuenta su cosmovisión del agua.

En la cosmovisión andina el agua es un ser vivo y es también un ser vivificante que fecunda a la tierra año a año para la re-creación de la vida. Si bien la visión del agua en la región andina tiene particularidades de acuerdo a las distintas culturas indígenas existentes, a la diversidad de áreas ecológicas, a las diferentes ubicaciones de las cuencas, etc., existen comunes denominadores que deben de ser mantenidos y respetados. Para los pueblos andinos, el agua es mucho más que un recurso hídrico. El agua es un ser vivo, proveedor de vida y de animación del universo. Con el agua se dialoga, se le trata con cariño, se le cría. Esta visión ha sido factor fundamental para la adecuada

cosecha, conservación y reproducción de los recursos hídricos en los Andes. El agua proviene de Wirakocha, dios creador del universo, que fecunda la Pachamama (madre tierra) y permite la reproducción de la vida. Es, por tanto, una divinidad que está presente en los lagos, las lagunas, el mar, los ríos y todas las fuentes de agua.

Para entender esta cosmovisión y sus implicaciones, y actuar de forma adecuada frente a ella, es necesario emplear sociólogos y antropólogos en el estudio socioeconómico.

### 2.2.5.2 Otros Usuarios

La yuxtaposición y la ubicación geográfica e hidrológica entre sí de los usuarios del agua varían de acuerdo a las características de la cuenca. El objetivo principal de un Plan de Gestión de Agua a nivel de cuenca es alcanzar una distribución y uso equitativo entre los diferentes usuarios, y así evitar los potenciales conflictos. Además del uso y consumo de agua, hay que cuidar la calidad de agua descargada por un usuario agua arriba, que otros usuarios aguas abajo vuelvan a utilizar.

**Tabla 2.4 Otros Usos de Agua**

CATEGORÍA	USO Y REQUERIMIENTOS
Centros urbanos – uso doméstico	Consumo doméstico, comercial, industrial; importancia comercial; política de tarifas por consumo; grado de tratamiento y reuso de aguas residuales
Agricultura	Agricultura de subsistencia; agricultura comercial; importancia económica
Ganadería	Agricultura de subsistencia; agricultura comercial; importancia económica
Industria	Agroindustria; manufactura; importancia económica
Minería	Procesamiento de mineral; tratamiento y reuso; contaminación

### 2.2.6 Riesgos

Cualquier actividad humana posee algún riesgo intrínseco - desde el nivel personal hasta el nivel corporativo, o en casos extremos hasta un nivel regional o nacional. La revisión y evaluación de riesgos asociados con el uso de agua debe ser obligatoria para actividades que potencialmente tengan un impacto moderado – alto a su entorno. El agua representa un riesgo tanto estratégico como operacional. (Tabla 2.6). Las técnicas de evaluación y control de riesgos se detallan en la Sección 2.6.

**Tabla 2.5 Riesgos**

CATEGORIA	DESCRIPCION	OPORTUNIDADES	AMENAZAS
Riesgos Estratégicos	Acceso a recursos; seguridad de la inversión, acceso a personal capacitado, seguridad de infraestructura	Mejorar la imagen de la empresa; buenas relaciones con entidades fiscalizadoras; personal contento y entusiasmado; seguridad de suministro de electricidad, acceso vial etc.	Empeorar la imagen de la empresa; dificultades con entidades fiscalizadoras; personal descontento y difícil de mantener; interrupciones de suministro de electricidad y acceso vial
Riesgos Operacionales	Falta de agua o seguridad de suministro; calidad de agua no adecuada; potencial de contaminación	Control y confianza sobre suministro de agua; buenas relaciones con vecinos por no contaminar; oportunidad de vender agua tratada.	Suministro de agua poco confiable – interrupciones a la producción; dificultades y disputas con vecinos y fiscalizadores sobre calidad y contaminación

### 2.2.7 Gestión Ambiental

De acuerdo al ordenamiento jurídico de los países analizados, los proyectos mineros en su gran mayoría deben obtener un Permiso Ambiental para su construcción y posterior operación. En la sección 2.5.1 se da un breve resumen respecto del ingreso y tramitación de los proyectos respectivos.

La Gestión de Agua es un subconjunto de la Gestión Ambiental del proyecto y operación. Generalmente, el agua es el componente ambiental más visible y con más potencial de disputas durante todas las fases de un proyecto minero. Con la excepción de las operaciones menores, vale la pena tener un gerente o subgerente con responsabilidades directamente sobre el suministro de agua, variaciones en la disponibilidad debido a variaciones climáticas o la presencia de otros proyectos y operaciones mineras, agrícolas o industriales, y también responsable de la monitorización y del cumplimiento con las normas de calidad de cualquier efluente líquido.

**Tabla 2.6 Gestión Ambiental y Etapas de Vida del proyecto**

ETAPA	ASPECTOS AMBIENTALES
Exploración y planificación	<p>Minimizar los accesos de vehículos y asegurar que no se convierten en canales de erosión. Minimizar el área de plataformas de perforación y rehabilitarlas a terminar los sondeos. Maximizar la recirculación de agua y evitar la descarga de lodos. Remover todo tipo de residuos. Realizar los estudios de línea base y establecer programas de monitorización de las variables ambientales. Prohibir todo tipo de cacería o interferencia con la fauna silvestre. Fomentar la participación de comunidades a través del empleo o como proveedores de comestibles y servicios.</p>
Construcción	<p>Asegurar que todos los permisos sectoriales y acuerdos con comunidades estén al día y los compromisos se cumplen. Fomentar la participación de comunidades a través del empleo y como proveedores de comestibles y servicios. La máxima dotación de personal normalmente ocurre durante la fase de construcción y es importante mantener un estricto control sobre los contratistas y subcontratistas a través de cursos de capacitación, charlas, y el refuerzo de la política de conservación ambiental y respecto a las comunidades. Se deben mantener los programas de monitorización ambiental y social y modificarlos para que sean más representativos.</p>
Operación	<p>Mantener los programas de participación y aportes a las comunidades, la protección ambiental. Realizar las actividades de la operación siempre pensando en la fase de cierre y post-cierre. Mantener los programas de monitorización social y ambiental y mantener informadas a las autoridades correspondientes y las comunidades. Maximizar los cursos de capacitación para mejorar las posibilidades del personal en el período post-cierre. Realizar auditorías internas.</p>

ETAPA	ASPECTOS AMBIENTALES
Cierre	Mantener informado al personal, las comunidades y las autoridades sobre el Plan de Cierre y las actividades diseñadas para minimizar los impactos. Activar programas de reinserción laboral. Confirmar los programas de monitorización post-cierre y las acciones de mitigación de impactos.
Post-cierre	Mantener los programas de monitorización ambiental y de inspección ocular durante un período suficiente para confirmar la estabilidad física y química del sitio dentro de los límites ambientales establecidos.

## 2.3 Reglamentos y Normas

### 2.3.1 Marco Legal Administrativo

El Marco Legal que rige el uso de agua es particular para cada país y comprende tanto el derecho de uso del agua como los reglamentos sobre su uso y su descarga. Las leyes respecto al agua deben ser interpretadas por un abogado especialista. En esta guía se presenta solamente una visión general del tema.

#### 2.3.1.1 Permisos y Licencias para Operar

Para la identificación de los principales actores en la gestión de las aguas en el contexto geográfico definido, se aborda en primer término sus instancias administrativas de gestión, tal y como se muestra en la Tabla 2.7.

Al analizar las constituciones de los tres países Sudamericanos estudiados, se puede señalar que todas ellas disponen del dominio público (estatal) de los recursos hídricos, centralizados en una entidad nacional con rango de Ministerio.

En relación con las instancias locales de gestión de recursos hídricos, ésta facultad recae en órganos municipales, provinciales o regionales. En el caso chileno, se dispone del uso de los recursos hídricos como un derecho real de su propietario, las instancias locales se encuentran frecuentemente fragmentadas en grupos de usuarios específicos.

Al nivel de cuenca, en su mayoría, las organizaciones están establecidas bajo la forma de comisiones, comités o consejos que involucran la gestión del recurso hídrico dentro del marco del desarrollo ambiental de la cuenca. Cabe señalar que es esta instancia la que cuenta con un menor nivel de desarrollo en los países estudiados, ya sea por la continua modificación de la normativa orgánica

de estas instancias, como por la dificultad de coordinación entre los organismos con competencias diversas.

**Tabla 2.7 Instancias de Organización de Cuencas (Foro del Agua de las Américas. Información de la Región Sudamérica, Octubre 2008)**

País	Sistema	Instancia Nacional	Instancia Local	Organizaciones de Cuenca
Bolivia	Central	Ministerio de Aguas, Viceministerio de Servicios Básicos, Viceministerio de Cuencas y Recursos Hídricos; Viceministerio de Riego; Superintendencia de Saneamiento Básico; Servicio Nacional de Riego y Consejo Interinstitucional del Agua	Gobiernos Departamentales y Municipales	Existe el marco normativo que se encuentra en proceso de constitución de las organizaciones a nivel de cuencas. Existen organizaciones sectoriales y departamentales
Chile	Central	Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas (DGA). Obs <sup>1</sup> .	Instancias locales fragmentadas por sectores usuarios. Obs <sup>2</sup> .	Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) – Iniciativas de Corporaciones de Cuencas. Obs <sup>3</sup> .
Perú	Central	Autoridad Nacional del Agua (En proceso de Implementación)	Direcciones Regionales de Agricultura	Autoridad Autónoma de Cuenca Hidrográfica (AACH); Juntas de Usuarios

Obs1: Cabe señalar que si bien la DGA se encarga de la planificación del recurso hídrico, existen otras instituciones, dependientes de distintos ministerios y servicios públicos que tienen injerencia directa o indirecta en la gestión del recurso hídrico; Ej. Ministerio de Agricultura, DOH, CNR, etc.

Obs2: La Ley sólo reconoce como actores válidos a las organizaciones de usuarios compuestas por usuarios con derechos de agua constituidos, siendo solamente éstas las que poseen injerencia local en la gestión de la cuenca.

Obs3: Se encuentra en proceso de implementación una Estrategia de Cuencas en Chile (con la aplicación de 3 experiencias piloto), no existiendo a la fecha la definición de las formas de organización de estas.

Cabe destacar dentro del contexto de la gestión a nivel de cuenca el caso Boliviano. En este país



se ha creado, dentro de la estructura del Estado, un Consejo Técnico Social como una instancia del Ministerio de Aguas, encargado de articular las actividades del ejecutivo con representantes de la sociedad civil. Asimismo, mediante Ley 2878 se crea un nuevo organismo regulador del uso de agua para riego, agropecuario y forestal, con participación mayoritaria de las organizaciones de regantes y la habilitación para la creación de comités locales de cuenca.

### ***2.3.1.2 Evaluación del Impacto Ambiental***

A continuación se presentan en forma resumida los trámites actuales respecto a la presentación y aprobación ambiental de proyectos en los tres países considerados en Sudamérica:

#### **Bolivia**

Los instrumentos normativos de la gestión ambiental Boliviana poseen dos escalas de aplicación:

1. De alcance general
  - a. Ley del Medio Ambiente y sus seis reglamentos, dentro de los que se cuenta el reglamento general de control ambiental, que define los instrumentos de alcance particular y el reglamento en materia de contaminación hídrica, que define los parámetros de calidad del agua de las descargas al ambiente.
  - b. Reglamento ambiental para actividades mineras, que regula la aplicación del capítulo del medio ambiente del Código de Minería y reglamenta las actividades de las empresas que realicen trabajos de prospección, exploración, explotación, concentración, fundición y refinación.
2. De alcance particular, que son utilizados para prevenir o controlar los impactos al Medio Ambiente ocasionados por la explotación minera. Dentro de estos instrumentos se tienen:
  - a. Instrumentos de prevención, realizados y presentados antes de la construcción del proyecto minero, así como para aquellos emprendimientos que se encontraban en operación antes de la entrada en vigencia de la ley de Medio Ambiente y sus reglamentos. Estos instrumentos son los siguientes:
    - i Declaratoria de Impacto Ambiental (DIA), la misma que constituye una Licencia Ambiental que es otorgada por la Autoridad Ambiental Competente a toda actividad minera nueva con carácter previo a su implementación<sup>4</sup>.
    - ii Declaratoria de Adecuación Ambiental (DAA), esta Licencia Ambiental es otorgada por la Autoridad Ambiental Competente a toda actividad minera iniciada

---

<sup>4</sup> El procedimiento para la obtención de la DIA se inicia con el llenado de la Ficha Ambiental. La Ficha Ambiental es un documento técnico que marca el inicio del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental. La Ficha Ambiental tiene como objetivo determinar la categoría de Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental (EEIA) que se debe realizar. Contiene información general sobre el proyecto, obra o actividad, se determinan los impactos clave y las posibles soluciones para los impactos negativos. Tiene categoría de declaración jurada y debe realizarse en la etapa de prefactibilidad del proyecto.

Una vez obtenida la categoría del proyecto, obra o actividad se procede a realizar el respectivo EEIA según lo siguiente:

Categoría 1: EEIA Analítico Integral  
Categoría 2: EEIA Analítico Específico

Luego de presentado y aprobado el respectivo estudio de evaluación de impacto ambiental según la categoría se otorga la DIA.

antes del 4 de abril de 1996 (entrada en vigencia de los RLMA) o que se encuentra actualmente en operación, luego que el representante legal de la misma informa sobre el estado ambiental de sus operaciones<sup>5</sup>.

- iii Certificado de Dispensación Ambiental Categoría 3 (CD-C3) para Actividades Mineras Menores con Impactos Ambientales No Significativos (AMIAC<sup>6</sup>). Para la obtención del CD-C3 el representante legal de la operación minera debe llenar un formulario (Anexo II del RAAM) en la parte correspondiente a las AMIAC y presentarlo a la Autoridad Ambiental Departamental (Prefectura) que es quien emite el correspondiente CD-C3.
- iv Certificado de Dispensación Ambiental Categoría 3 para Actividades de Exploración<sup>7</sup>. Para la obtención del CD-C3 el representante legal de la operación minera debe llenar un formulario (Anexo II del RAAM) en la parte correspondiente a la exploración y presentarlo a la autoridad ambiental departamental (Prefectura) que es quien emite el correspondiente CD-C3.
- v Certificado de Dispensación Categoría 4 (CD-C4) para Actividades de Prospección<sup>8</sup>. Para la obtención del CD-C4 el representante legal de la operación minera debe llenar un formulario de prospección (Anexo III del RAAM) y presentarlo a la autoridad ambiental departamental (Prefectura) cuyo sello de recepción equivale como el CD-C4.

Instrumentos de Control, aplicados durante la operación minera, destinados a informar a la autoridad respecto del estado ambiental del proyecto.

## **Chile**

La normativa ambiental Chilena define a través de su Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (19300/94) un Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (DS 95/01), el cual en su artículo 3, Título I lista los proyectos que deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Por su parte, el SEIA posee 2 vías de ingreso y tramitación, que dependiendo de la generación o presencia de efectos característicos o circunstancias (ECS) definidos en el Título II del reglamento del SEIA, ameritan la presentación del proyecto bajo las siguientes formas:

---

5 Este informe sobre el estado ambiental de las operaciones mineras se realiza mediante la presentación del Manifiesto Ambiental. El Manifiesto Ambiental es un documento con categoría de declaración jurada que contiene información general sobre las actividades que se realiza, los impactos producidos y se propone un Plan de Adecuación Ambiental. Una vez aprobado el Manifiesto Ambiental la autoridad ambiental competente otorga la DAA.

6 Las AMIAC son operaciones de la minería subterránea ubicadas en áreas no protegidas de la cordillera occidental, altiplano y cordillera oriental que comprenden: Labores de reconocimiento, desarrollo, preparación y explotación mediante galerías, cuadros, rampas, piques, chimeneas y rajos con capacidad de extracción igual o menor a 300 toneladas/mes; y/o concentración de minerales a escala igual o menor a 300 toneladas/mes con trituración y molienda, clasificación y concentración gravimétrica y magnética, separación de sulfuros por flotación superficial, amalgamación y operaciones de secado, almacenamiento y transporte de concentrados resultantes.

7 Corresponde a las siguientes actividades: Exploración geofísica, perforación por sondeo, exploración por pozos, cuadros y trincheras (zanjas y calicatas) y otros métodos de exploración que no produzcan desmontes y cuya actividad involucre apertura de sendas, instalación de campamentos, preparación de sitios para la construcción de plataformas de perforación, almacenes y depósitos.

8 Corresponde a actividades mineras de: Levantamiento topográfico, cateo, mapeo geológico, prospección geoquímica y prospección aérea.

- a. **Declaración de Impacto Ambiental**, si el proyecto no presenta los ECS, señalados en el título II del Reglamento del SEIA.
- b. **Estudio de Impacto Ambiental**, si el proyecto presenta al menos uno de los ECS señalados en el título II del Reglamento del SEIA.

Respecto de la presentación de los Estudios y/o Declaraciones de Impacto Ambiental, la legislación vigente ha definido como entidad coordinadora del SEIA a las direcciones regionales de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), correspondiente a la región en que se realiza el proyecto. Es importante destacar que en Chile no existe un tratamiento “especial” para ningún tipo de proyecto minero.

## **Perú**

De acuerdo al marco legal general, el Gobierno del Perú ha establecido el principio de ventanilla única o sectorialidad en lo que respecta a las competencias ambientales, designado al Ministerio de Energía y Minas (MINEM), como la autoridad ambiental competente para la aprobación de las distintas actividades mineras.

La presentación de los Estudios de Impacto Ambiental de proyectos mineros se enmarca dentro de lo establecido en el Decreto Supremo N° 016-93-EM, el Reglamento de Protección Ambiental para Actividades Minero Metalúrgicas y sus modificatorias, la Guía para Elaborar Estudios de Impacto Ambiental del Sub-sector Minero y la Guía para Elaboración de Planes de Cierre de Minas. Los procedimientos para la aprobación de los EIAs se encuentran sujetos a lo reglamentado por el Texto Único de Procedimientos Administrativos (TUPA) del MINEM (DS N° 061-2006-EM), de acuerdo con las disposiciones destinadas a uniformizar procedimientos administrativos ante la Dirección General de Asuntos Ambientales (D.S. N° 053-99-EM) y Reglamento de Consulta y Participación Ciudadana en el Procedimiento de Aprobación de los Estudios Ambientales en el Sector Energía y Minas (R.M. N° 596-2002-EM/DM).

### ***2.3.1.3 Cumplimiento con Estándares de Emisiones***

#### **Normativa de Calidad del Agua.**

Adicional a la cantidad de agua solicitada para un proyecto minero, uno de los elementos a considerar para el inicio de la operación de un proyecto minero radica en el cumplimiento de la normativa de calidad de agua correspondiente. Al analizar la normativa en cada uno de los países estudiados, observamos que los cuerpos normativos promulgados por cada uno de los países difieren en forma y objeto normado, teniendo ellos por objetivos:

- Normar la calidad base del recurso agua, tanto para diferentes usos como de cuerpo receptor de eventuales descargas al ambiente.
- Normar los límites máximos de los efluentes líquidos de los procesos mineros.

A continuación se realizará una revisión sumaria de la normativa vigente y su ámbito de aplicación.

## **Bolivia**

Dentro del contexto Boliviano encontramos en su Ley del Medio Ambiente (N° 1333 promulgada el 27 de abril de 1992), y su respectivo Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, un instrumento de referencia para la determinación de la calidad de agua exigida para las operaciones mineras. Asimismo, el Decreto Supremo N° 24782 del 31 de julio de 1997, Reglamento Ambiental Para Actividades Mineras posee en su título VI definiciones respecto al manejo de aguas en actividades mineras.

## **Chile**

El desarrollo normativo Chileno ha centrado sus esfuerzos en acotar las condiciones de calidad de las aguas de acuerdo a los usos requeridos, lo cual se observa en la siguiente tabla.

**Tabla 2.8 Normativa Relevante de Calidad de Aguas en Chile**

Norma	N°	Año	Nombre
DS	46	2002	Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas
DS	609	1998	Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de RILES a sistemas de alcantarillado
DS	90	2000	Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de RILES a aguas marinas y continentales superficiales
NCh	409	1984	Requisitos de calidad del agua para agua potable
NCh	1333	1987	Requisitos de calidad del agua para diferentes usos

Como se observa en la Tabla 2-8, la normativa Chilena se ha abocado a la definición de la calidad de aguas tanto para los usos asociados (NCh 409, NCh 1333), como para las descargas y emisiones a los cuerpos receptores, sin incluir indicadores de calidad del cuerpo de agua en si.

Cabe señalar que actualmente en Chile se encuentran en desarrollo las siguientes iniciativas:

- Definición de la calidad secundaria de las aguas de cada una de las cuencas relevantes del país, realizada en base a la “Guía CONAMA para el establecimiento de las normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas”.
- Implementación de una Estrategia de Cuencas en Chile, con experiencia en 3 cuencas piloto a la fecha. Cabe mencionar, además, la ley de cierre de minas y la ley de glaciares que se relacionan directamente con la calidad de las aguas.

## Perú

La normativa peruana respecto de calidad de las aguas incluye, a diferencia del caso boliviano y chileno, tanto el desarrollo de niveles máximos de efluentes para la actividad Minera, como los estándares base de calidad de los cuerpos receptores.

**Tabla 2.9 Normativa Relevante de Calidad de Aguas en Perú**

Norma	Año	Organismo
Ley General de Aguas (D.L. N° 17752)	1969	INRENA
Niveles Máximos Permisibles para Efluentes Líquidos para las Actividades Minero-Metalúrgicas (R.M. N° 011-96-EM/VMM)	1997	MINEM
Reglamento de la Ley General de Aguas (D.S. N° 261-69-AP) y modificatorias (D.S. N° 007-83-SA y D.S. N° 003-2003-SA)	1969, 1983, 2003	Ministerio de Salud
Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (D.S. N° 002-2008-MINAM)	2008	MINAM
Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338)	2009	Autoridad Nacional del Agua

De la revisión de la normativa relevante de calidad de agua en el Perú aplicable a las labores mineras observada en la Tabla 2.9, se destaca lo siguiente:

- Niveles Máximos Permisibles para Efluentes Líquidos Minero – Metalúrgicos Resolución Ministerial N° 011-96–EM.

Establece los valores límite que deben cumplir los parámetros regulados en los vertimientos de efluentes procedentes de las operaciones minero – metalúrgicas. Los valores están dados como concentraciones máximas permisibles para los metales (plomo, cobre, zinc, hierro, arsénico), los sólidos suspendidos totales, pH y el cianuro total y como valores máximos y mínimos para el pH. La concentración de metales se refiere a la fracción disuelta. Establece dichos límites para el “Valor en Cualquier Momento” (instantáneo) y para el “Valor Promedio Anual”.

- Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (D.S. N° 002-2008-MINAM)

Establecen el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. Los Estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural. Son obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas

públicas, y son también un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Cabe señalar que existe en el Perú un nuevo ordenamiento jurídico (Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos) que crea la Autoridad Nacional del Agua y los Consejos de Cuencas Hidrográficas, organismos que en pos del ordenamiento de cuencas pueden establecer límites particulares de calidad de aguas aplicables tanto al cuerpo de agua como a los efluentes de los procesos productivos mineros.

### **2.3.2 Derechos de Agua**

Los Derechos de Agua son instrumentos fundamentales para cualquier actividad industrial o comercial. Su naturaleza depende de la Constitución y las Leyes del país. Pueden ser derechos de uso que indican el caudal otorgado y el uso autorizado, como es el caso de Perú y Bolivia donde “el agua tiene que ser tratada como un bien público, social y cultural, antes de ser tratada como un bien mercantil”. Una vez terminado la actividad de uso, vence el derecho.

Alternativamente, pueden ser derechos patrimoniales, es decir el Estado otorga o vende los derechos a un privado, y pasan a ser parte de su patrimonio para usar o vender total o parcialmente a terceros. En algunos casos (en Chile) el no uso de los derechos otorgados es multado, acción intencionada a prevenir la acumulación de derechos que producen distorsiones al mercado de agua

### **2.3.3 Derechos de Pueblos Originarios**

Las disposiciones del Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), aceptados por los países estudiados, tienen el objetivo de promover y proteger una serie de derechos para los pueblos indígenas. Se trata de un compromiso internacional - ratificado por el Congreso nacional y promulgado por el Presidente de la República- que los Estados tienen la obligación de cumplir.

A continuación se presentan algunos de los Artículos del Convenio 169 que deben ser aplicados dentro de la Gestión de Agua y el desarrollo de actividades mineras en zonas con pueblos considerados de origen indígena:

#### Artículo 5

*Al aplicar las disposiciones del presente Convenio:*

- a) *deberán reconocerse y protegerse los valores y prácticas sociales, culturales, religiosos y espirituales propios de dichos pueblos y deberá tomarse debidamente en consideración la índole de los problemas que se les plantean tanto colectiva como individualmente;*
- b) *deberá respetarse la integridad de los valores, prácticos e instituciones de esos pueblos;*

#### Artículo 6

1. *Al aplicar las disposiciones del presente Convenio, los gobiernos deberán:*

- a) *consultar a los pueblos interesados, mediante procedimientos apropiados y en particular a través de sus instituciones representativas, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarles directamente;*
- b) *establecer los medios a través de los cuales los pueblos interesados puedan participar libremente, por lo menos en la misma medida que otros sectores de la población, y a todos los niveles en la adopción de decisiones en instituciones electivas y organismos administrativos y de otra índole responsables de políticas y programas que les conciernan;*

#### Artículo 7

1. *Los pueblos interesados deberán tener el derecho de decidir sus propias prioridades en lo que atañe el proceso de desarrollo, en la medida en que éste afecte a sus vidas, creencias, instituciones y bienestar espiritual y a las tierras que ocupan o utilizan de alguna manera, y de controlar, en la medida de lo posible, su propio desarrollo económico, social y cultural. Además, dichos pueblos deberán participar en la formulación, aplicación y evaluación de los planes y programas de desarrollo nacional y regional susceptibles de afectarles directamente.*

#### Artículo 13

1. *Al aplicar las disposiciones de esta parte del Convenio, los gobiernos deberán respetar la importancia especial que para las culturas y valores espirituales de los pueblos interesados reviste su relación con las tierras o territorios, o con ambos, según los casos, que ocupan o utilizan de alguna otra manera, y en particular los aspectos colectivos de esa relación.*
2. *La utilización del término «tierras» en los artículos 15 y 16 deberá incluir el concepto de territorios, lo que cubre la totalidad del hábitat de las regiones que los pueblos interesados ocupan o utilizan de alguna otra manera.*

#### Artículo 15

1. *Los derechos de los pueblos interesados a los recursos naturales existentes en sus tierras deberán protegerse especialmente. Estos derechos comprenden el derecho de esos pueblos a participar en la utilización, administración y conservación de dichos recursos.*
2. *En caso de que pertenezca al Estado la propiedad de los minerales o de los recursos del subsuelo, o tenga derechos sobre otros recursos existentes en las tierras, los gobiernos deberán establecer o mantener procedimientos con miras a consultar a los pueblos interesados, a fin de determinar si los intereses de esos pueblos serían perjudicados, y en qué medida, antes de emprender o autorizar cualquier programa de prospección o explotación de los recursos existentes en sus tierras. Los pueblos interesados deberán participar siempre que sea posible en los beneficios que reporten tales actividades, y percibir una indemnización equitativa por cualquier daño que puedan sufrir como resultado de esas actividades.*

1. A reserva de lo dispuesto en los párrafos siguientes de este artículo, los pueblos interesados no deberán ser trasladados de las tierras que ocupan.
2. Cuando excepcionalmente el traslado y la reubicación de esos pueblos se consideren necesarios, sólo deberán efectuarse con su consentimiento, dado libremente y con pleno conocimiento de causa. Cuando no pueda obtenerse su consentimiento, el traslado y la reubicación sólo deberán tener lugar al término de procedimientos adecuados establecidos por la legislación nacional, incluidas encuestas públicas, cuando haya lugar, en que los pueblos interesados tengan la posibilidad de estar efectivamente representados.

## 2.4 Implementación del Plan de Gestión de Agua

Para que la implementación del Plan de Gestión de Agua tenga éxito, hay implementar mecanismos adecuados de administración, ejecución, participación de actores, monitorización, y auditoría, entre otros. A continuación se detallan los aspectos más importantes:

### 2.4.1 Aspectos del Plan

#### 2.4.1.1 Administración y Responsabilidades Definidas

Para que la gestión sea eficaz, hay que definir bien las funciones y responsabilidades de los distintos participantes en el proceso.

La Figura 2.4 indica la organización típicamente requerida para una adecuada gestión de agua al nivel de cuenca. La composición del Comité Consultivo puede variar dependiente del sistema política nacional/local y los componentes físicos, económicos y sociales de la cuenca.

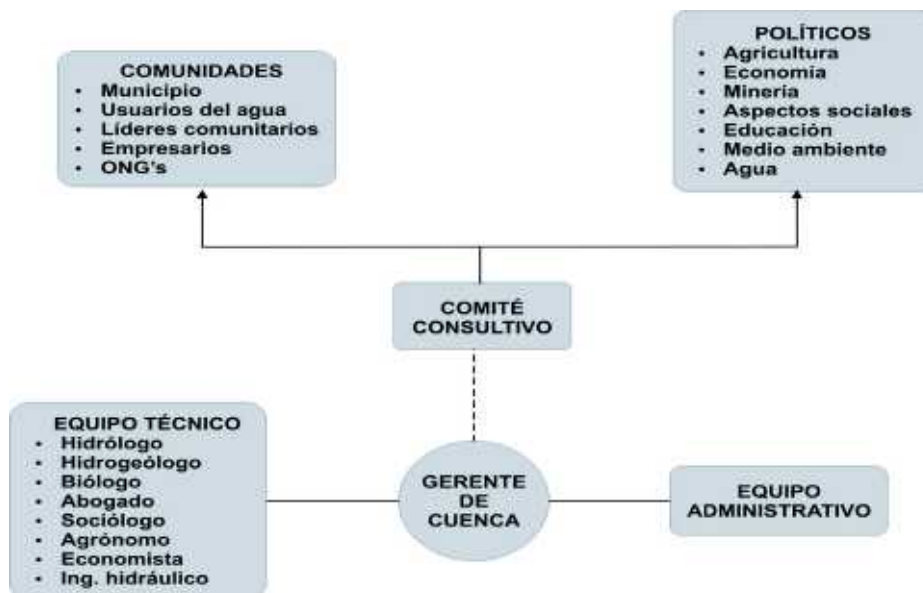
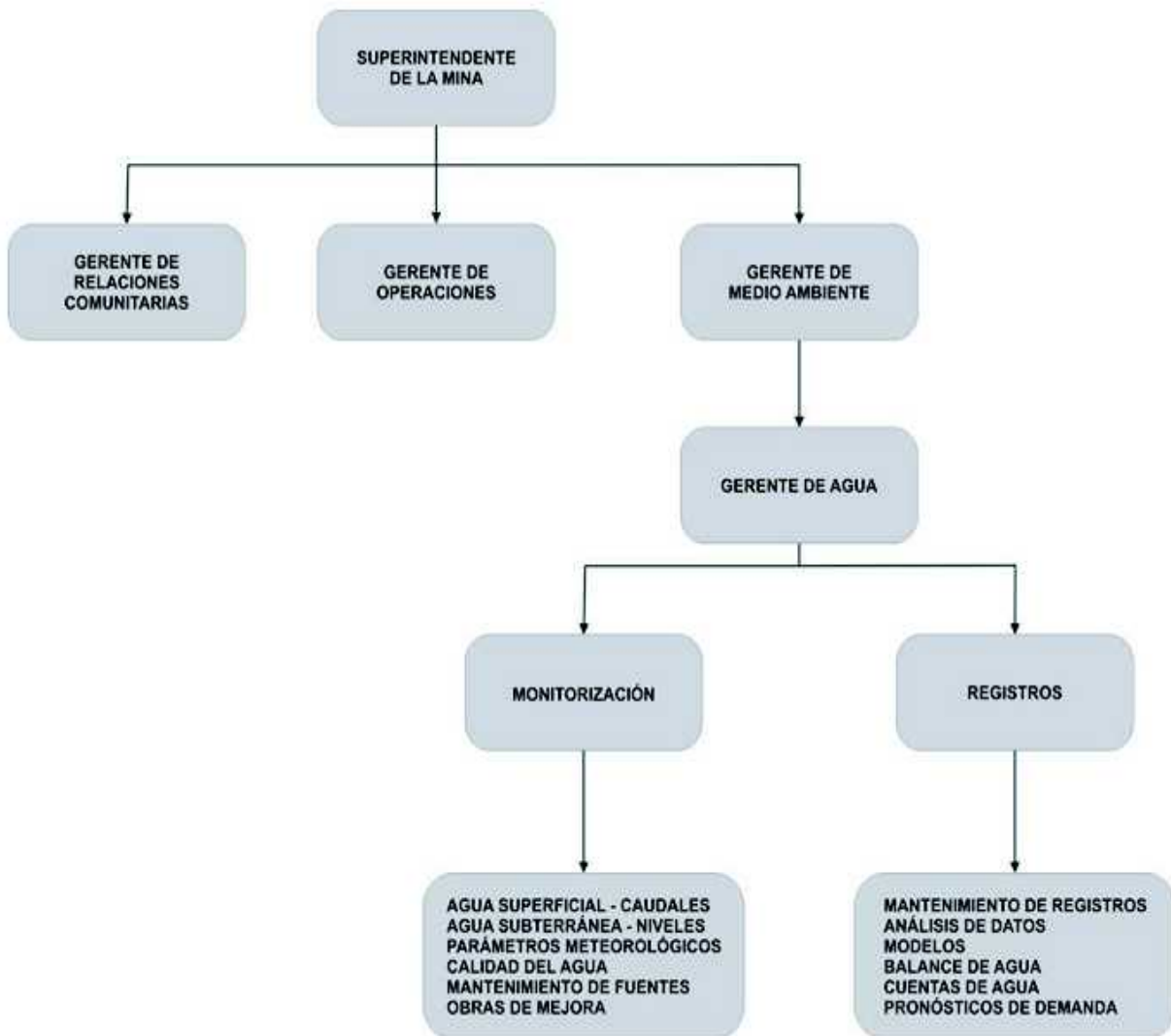


Figura 2.4 Organización Típica para la Gestión de Cuencas



En el ámbito de un proyecto minero el organigrama típico se muestra en la figura 2.5. En el caso de un proyecto de este tipo hay la necesidad de cumplir con las normas vigentes ambientales y sectoriales, y el énfasis sería más enfocado en mantener el uso y calidad de agua dentro de los límites asegurando que la operación funcione de manera más eficiente, más económica y con mínima exposición a riesgos.



*Figura 2.5 Organigrama Típico de Gestión de Agua en Proyecto Minero*

#### **2.4.1.2 Operación Controlada**

Tener una operación controlada significa que se ha examinado y estudiado cada elemento en la cadena de uso de agua para asegurar que la operación sea la más eficiente posible. Para operaciones mineras, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

#### **Control de cantidades de agua**

Hay que minimizar las pérdidas por filtraciones o evaporación y que la humedad del concentrado y

los relaves sea ajustada para usar la mínima cantidad posible de agua (COCHILCO, 2008; Consejo Minero, 2002a). En la sección 3.4.6 se encuentran más detalles sobre el uso eficiente de agua en las operaciones mineras.

### **Control de calidad de descargas**

El agua es un elemento por su naturaleza reusable. Los usos consuntivos de agua son relativamente pocos, aparte de la evapotranspiración de la vegetación y la evaporación de la superficie de cuerpos de agua. En general el agua es devuelta al medio ambiente y queda disponible para usos posteriores. Uno de los reclamos más frecuentes a la industria y las empresas mineras es la contaminación del agua, que la deja en condiciones no usables para los usuarios aguas abajo.

Por ser un elemento de valor, la mayoría de las operaciones mineras son diseñadas para una descarga cero, es decir agua del proceso está devuelta para su reuso, y no hay descargas de aguas contaminadas al medio ambiente. Sin embargo, aunque sean zonas áridas o semiáridas, existen precipitaciones y escorrentía que en algunos casos generan aguas ácidas cuando se contactan con roca reactiva (con compuestos de sulfuros), típicamente de escombreras de desmontes de roca estéril o de labores subterráneas (Consejo Minero 2002b). En la Sección 3.4.5 se describen los impactos de aguas ácidas sobre otros usuarios o el medio ambiente y métodos de prevención o tratamiento.

### **Operación que incluye consideración del período post-cierre**

Las buenas prácticas de operación implican que la planificación para el cierre de una mina empieza durante la fase de investigación y diseño de la mina, y que toda actividad durante la operación debe ser desarrollada pensando en el cierre y período post-cierre. Así se evitan acciones difíciles y costosas a revertir cuando la mina llega al fin de su vida económica.

La minería, por su naturaleza, es una actividad intrusiva que puede remover miles o millones de toneladas de roca, procesando una porción menor y dejando como un desecho una gran parte del material excavado. En el caso que este material contuviera una mineralización sulfurada, con minerales de la familia de las piritas, el potencial que tiene el agua de precipitación de generar aguas ácidas es alto, con la probabilidad de contener niveles elevados de metales disueltos. Bajo condiciones de alta acidez la flora no florece, dejando áreas desprovistas de vegetación y expuestas a la erosión y la fauna en malas condiciones de salud es forzada a emigrar a otras áreas no afectadas. Sin un tratamiento adecuado, la generación de aguas ácidas y sus efectos son de largo plazo.

El procesamiento del mineral también involucra el uso de productos químicos, los cuales sin un manejo adecuado pueden contaminar los suelos o cursos de agua.

Las excavaciones mineras (tajos / rajos) y los depósitos de desechos (escombreras de estériles / desmontes) pueden presentar una inestabilidad física a largo plazo, que limita los usos del terreno post-cierre de la mina por los riesgos que se presentan a las personas o los animales.

Con una planificación adecuada, se puede evitar la mayoría de los impactos a largo plazo, o por lo menos mitigarlos y/o contenerlos.

El Ministerio de Energía y Minas de Perú (Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros<sup>9</sup>) ha publicado en su sitio web una notable serie de guías respecto al cierre de minas.

#### ***2.4.1.3 Capacitación Adecuada de Personal***

A nivel tanto de cuenca como de operación minera es fundamental tener personal profesional y técnicamente capacitado. Lo ideal, y como meta para cualquier organización, es contar con personal local capacitado por que ellos no solamente conocen el área y las características físicas de la cuenca, sino también tienen un trato de mayor confianza con los habitantes del lugar.

Un presupuesto adecuado debe ser asignado para la capacitación de personal local que trabaja en el área de gestión de cuenca.

#### ***2.4.1.4 Agregar Valor donde sea Posible***

Muchas veces existen oportunidades de agregar valor al área de la operación, no solamente valor económico pero también valor ambiental, ecológico o cultural. Algunas áreas se encuentran degradadas sea por actividades humanas previas (pastoreo excesivo, mala gestión de la tierra), o por causas naturales tales como erosión de suelos, y existe la oportunidad de mejorar la calidad del suelo y vegetación y así, agregar valor al área.

Otro ejemplo es el impacto positivo sobre áreas incluidas en las concesiones mineras de la alta cordillera andina habitados por grupos importantes de guanaco (cameloides – Lama guanacoe) que han multiplicado y prosperado debido a la protección ante la cacería que dan las empresas mineras<sup>10</sup>. Además se han realizado importantes estudios sobre estos animales silvestres y su habitat, estudios que normalmente no se realizan por falta de fondos.

Lo importante es que las actividades humanas no disminuyan el valor del área, especialmente la calidad del agua.

#### ***2.4.1.5 Oportunidades para Mejorar la Gestión***

Una de las piedras angulares de los estándares ISO de gestión es el lema de Mejora Continua. En el caso que la empresa operadora se haya certificado bajo los estándares ISO 9001; 14001, 18001 etc. sus operaciones serán sujetas a revisiones periódicas lo que incluyen la búsqueda de oportunidades de mejoras.

Un ejemplo de una buena gestión sería el uso de energía alternativa (eólica, geotérmica etc.) para el bombeo de agua, o la inclusión de turbinas de paso en la línea de suministro de agua. Otra oportunidad sería en el campo de apoyo a otros usuarios, especialmente los agricultores, en mejorar y hacer más eficiente su consumo de agua a través de sistemas de contabilidad de agua (cuentas de agua).

### **2.4.2 Participación de los Grupos de Interés (Stakeholders)**

La minería es una actividad en donde, por lo general, se radicalizan y polarizan las posiciones res

---

9 <http://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50>

10 [www.pelambres.cl](http://www.pelambres.cl)

pecto a la aceptación del inicio de sus actividades o la percepción de los beneficios y/o impactos negativos que ésta genera en las comunidades. Como ha sido verificado, los conflictos entre comunidades y empresas mineras han venido en aumento, generando incluso escaladas de violencia. Ante esta situación, la estrategia del diálogo y concertación es una alternativa válida a fin de generar consensos y dar viabilidad a procesos de construcción de confianzas y relaciones simétricas, horizontales y de mutuo beneficio para las partes involucradas.

La participación de los grupos de interés es reconocida como un ingrediente esencial de las políticas y programas exitosos y creíbles. La mejor forma de interactuar con los grupos de interés y las comunidades es la creación de espacios de diálogo.

La problemática existente entre las comunidades y la minería por el agua es compleja, la gestión del recurso necesita de los enfoques, objetivos, culturas y demás aspectos socioculturales que traen consigo todos los actores de la cuenca. El diálogo entonces, se constituye en la única salida viable para la gestión de los conflictos con actividades mineras ya constituidas y en curso, mientras que también puede permitir el ingreso de nuevos proyectos mineros con licencia social, permitiendo la coexistencia y convivencia armónica.

En la actualidad, y respecto a la gestión del agua y del territorio, se vienen desarrollando una serie de factores a favor de la conformación y funcionamiento de espacios de diálogo y la búsqueda de consensos, entre ellos podemos citar:

- los de tipo de normativo (normas con enfoque de sostenibilidad y gestión integrada del agua, reconocimiento de la importancia de la participación ciudadana y su impulso en diversos aspectos, por ejemplo).
- sociales (necesidad de participación como resultado del desarrollo de una mayor ciudadanía ambiental, conciencia y práctica de sus derechos y deberes ambientales).
- experiencias de empresas respecto al uso de las mejores tecnologías disponibles (por ejemplo, en el Perú Millpo utiliza agua de mar desalinizada para sus operaciones, Xstrata Tintaya recircula el 80% del agua empleada, Cerro Verde aporta significativamente en la capacidad de almacenamiento de agua para todos los usos; pero así también existen las malas prácticas, en zonas áridas del Sur de Perú donde algunas empresas no aplican tecnología alguna que permita reducir su consumo, entrando en competencia con las otras actividades productivas).
- las diversas experiencias de monitoreo participativo que involucran a comunidades, empresas y otros actores.
- las percepciones y manifestaciones del cambio climático en la disponibilidad de agua.
- la percepción de que el actual formato y proceso seguido y generado a partir de los EIA's es insuficiente para generar la confianza de que los impactos negativos serán controlados y/o minimizados, entre otros.

Para el caso del Perú, además de las experiencias de monitoreo participativo, podemos citar algunos ejemplos de experiencias conjuntas en la gestión del agua y el territorio. En Cajamarca se ha dado inicio al proceso de elaboración de un Plan de Ordenamiento Territorial en forma mancomunada entre empresas, gobiernos locales y la sociedad civil.

### 2.4.2.1 Foros de Diálogo

Los foros de diálogo se pueden organizar tanto a nivel de cuenca como a mayor nivel, y pueden ser formales (respaldados por la legislación vigente) o informales. Un ejemplo muy exitoso de foro de diálogo a nivel nacional es el “Grupo de Diálogo Minería y Desarrollo Sostenible (GDMDS)” en Perú.

#### CASO PERUANO:

#### EL GRUPO DE DIÁLOGO MINERÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

El Grupo de Diálogo Minería y Desarrollo Sostenible (GDMDS) fue creado hace más de 8 años con el objetivo de promover el diálogo entre los diferentes actores sobre la minería y su relación con la gestión ambiental responsable y el desarrollo sostenible. Este espacio reúne a representantes de las principales empresas mineras, ONGs, consultores, comunidades, universidades, municipalidades, Defensoría del Pueblo, Organismo Supervisor de la Inversión de Energía y Minería - OSINERGMIN, y del Ministerio de Energía y Minas en el Perú.

El GDMDS es un espacio de encuentro que facilita que líderes diversos interactúen, se conecten, acuerden iniciativas, establezcan convenios, y mitiguen o esclarezcan sus grados de contradicción. El diálogo está basado en el respeto a las diferencias existentes, destacando las prácticas positivas, para encontrar el lado bueno de los hechos y aprender de la adversidad.

La existencia del GDMDS se basa en una afiliación libre y voluntaria. Su autoridad proviene de la capacidad para formular recomendaciones y emitir opinión basado en la transparencia, la rigurosidad técnica, el rescate de la opinión de las partes y la coherencia con los objetivos de desarrollo del país y de sus pobladores.

A través de la práctica el diálogo como método ha generado confianza entre actores de cada realidad local, apoyando la prevención y resolución de conflictos, el desarrollo de capacidades y el mejoramiento de políticas que permitan consolidar procesos de gestión concertada en el ámbito local, regional y nacional.

Un logro muy importante del GDMDS es el Acuerdo Minero “Por una Minería con Responsabilidad Social y Ambiental: Un acuerdo fruto del diálogo” (2005). El Acuerdo Minero es una propuesta de agenda pública de consenso. Sus adherentes se comprometen a promover la creación de una Autoridad Ambiental, independiente de la regulación del Ministerio de Energía y Minas, que garantice la fiscalización adecuada de los estudios, fomenta instrumentos y mecanismos de evaluación y monitoreo ambiental participativos, de alto nivel técnico, transparentes y permanentes. El trabajo de incidencia logró separar la competencia de fiscalización del Ministerio de Energía y Minas al crear el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – OSINERGMIN (2006). El Acuerdo plantea otros compromisos relacionados con la responsabilidad social y ambiental de las Empresas y el Estado, trabajar de manera coordinada con el Estado y de manera descentralizada para mejorar la transparencia, y la participación ciudadana, y a asumir un nuevo enfoque de gestión de cuenca, trabajando para la conservación y uso racional de recursos naturales especialmente el agua.

Desde hace un par de años la relación del Grupo de Diálogo con el Ministerio de Energía y Minas se ha visto fortalecida, a partir de la cual se ha trabajado coordinadamente para abrir espacios de deliberación sobre los procedimientos de participación ciudadana, y la inversión de la minería por conceptos de desarrollo sostenible, contribuyendo a las mejoras que sobre las mismas se han producido.

Ejemplos de foros de diálogo a nivel de cuenca son las Mesas del Agua en Chile, y el “Grupo Técnico Agua, Cuenca y Minería del Sistema Hídrico del Chili” en Arequipa, Perú. La reciente Ley de Recursos Hídricos en Perú prevé la instalación de Comités de Cuenca que son comisiones multisectoriales dependientes de la Autoridad Nacional del Agua, y deben considerar la participación de las organizaciones de usuarios de agua. Los Consejos de Cuenca se crean por cada cuenca hidrográfica o grupo de cuencas hidrográficas contiguas y participan en el proceso de elaboración de los planes de gestión de recursos hídricos de cuenca, que servirán de base para la toma de decisiones de la Autoridad Nacional del Agua.

#### CASO CHILENO:

#### MESAS DEL AGUA (MESA PÚBLICO-PRIVADA DE RECURSOS HÍDRICOS)

En el norte de Chile, en las zonas de extrema aridez, existen ejemplos recientes de una mejor cooperación entre las comunidades o agricultores y las empresas mineras con respecto a los beneficios mutuos asociados con un mejor uso compartido del agua. En Chile, bajo el alero de las autoridades regionales, se está promoviendo un diálogo entre las partes, conocido como “Mesa de Agua” (Cazalac, 2008).

#### EL GRUPO TÉCNICO AGUA, CUENCA Y MINERÍA DEL SISTEMA HÍDRICO DEL CHILI EN AREQUIPA, PERÚ

El Grupo Técnico del Sistema Hídrico del Chili es un grupo de trabajo de carácter técnico, enmarcado en el Sistema Regional de Gestión Ambiental, discute y analiza la problemática del río Chili, y también diseña propuestas de política. Fue constituido por Acuerdo Regional N° 033-2007-GRA/CR-Arequipa y se encuentra enmarcado en el Sistema de Gestión Ambiental de la región Arequipa.

Son sus objetivos son:

- La formulación de propuestas de políticas en gestión de cuenca con énfasis en la minería.
- La elaboración de un Plan de Gestión de la Cuenca del Río Chili.

A la fecha estaba conformado por 29 instituciones, entre las que se encuentran entidades públicas como gobiernos locales y oficinas descentralizadas de sectores, organizaciones de la sociedad civil, ONG's, empresas mineras, universidades, éstas son: Autoridad Regional Ambiental (ARMA), IRECA - Universidad Nacional de San Agustín, Asociación Civil Labor, Municipalidad Provincial de Arequipa, Ministerio del Ambiente, INRENA, INRENA RNSAB, PRONAMACHCS, SENAMHI, AUTODEMA, Gerencia Regional de Energía y Minas, Gerencia Regional de Agricultura, Sociedad Minera Cerro Verde, Pueblo Joven Cerro Verde, Municipalidad Distrital de Uchumayo, DESAGERSA, Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa (EGASA), SEDAPAR, COPASA, ATDR CHILI, SADA, Junta de Usuarios Chili Zona Regulada, Junta de Usuarios Chili Zona No Regulada, DESCO, INGEMMET, Junta de Usuarios la Joya, Comité de Gestión de la RNSAB, Colegio de Ingenieros del Perú-Filial Arequipa, INKABOR SAC.

Desde su instalación a la fecha ha realizado 17 reuniones ordinarias, numerosos talleres y otras actividades que han incluido conferencias de prensa, salidas y visitas de campo, y la organización de

eventos relacionados a la temática agua, cuenca y minería.

El Grupo Técnico es liderado por ARMA, IRECA-UNSA y la Asociación Civil Labor, las cuales conforman la Secretaría Técnica. Las reuniones se desarrollan cada mes y medio aproximadamente, y todos los miembros tienen activa participación en el desarrollo de las reuniones y actividades propuestas, existe un ambiente y apropiado para el diálogo gracias a la tolerancia y respeto entre los miembros.

después de poco más de dos años de funcionamiento, el grupo se ha visto fortalecido con la incorporación de seis miembros, permitiendo el ingreso de empresas y comunidades de la zona alta de la cuenca, además, se ha cohesionado más, existe mayor debate, capacidad y voluntad de propuesta y seguimiento a los acuerdos de las sesiones de trabajo.

Por otro lado, su trabajo ha irradiado hacia ámbitos regionales cercanos, como Moquegua y Tacna, en donde se ha apoyado la realización de eventos relacionados a la gestión del agua.

También en el estudio de caso del proyecto CAMINAR en Bolivia el proceso de diálogo ha dado resultados positivos:

#### CASO BOLIVIANO: INTERACCIÓN CON LOS GRUPOS DE INTERÉS DENTRO DEL PROYECTO CAMINAR

En Bolivia, durante el proceso de desarrollo de CAMINAR, se identificaron cuatro conjuntos de actores sociales e institucionales con los que se ha interactuado para el logro de la participación en las diferentes dinámicas realizadas, en talleres, reuniones, y trabajo de campo.

- Autoridades del Gobierno Central
- Autoridades Regionales
- Empresas Mineras (grandes, medianas y pequeñas)
- Comunidades, Municipios, ONG's y académicos

La posibilidad de interactuar con funcionarios del gobierno central ha sido uno de los elementos a ser comunicados a los otros actores que CAMINAR buscaba para interactuar en un ambiente de cordialidad, y proveer un elemento que permitió adecuados canales de comunicación.

Un segundo grupo de actores sociales e institucionales son las autoridades regionales, las mismas que no dudaron en ofrecer la información de base necesaria. También ayudaron en el proyecto con el envío de sus técnicos a las visitas de campo de monitoreo y seguimiento, y eso permitió a CAMINAR participar de algunas mesas de diálogo que estaban en desarrollo durante el período de implementación del proyecto.

El tercer grupo son los actores empresariales de la minería grande y mediana, cooperativas y pequeña minería, que explicaron sus preocupaciones ambientales, sus dinámicas de conflictos sociales, sus formas de resolverlas y también sus demandas ante autoridades regionales como nacionales. En este sentido se puede afirmar que a pesar de los problemas que confrontan estos empresarios por su falta de inversiones en prevención o mitigación ambiental, son concientes del deterioro y realizan ciertas propuestas para que se los tome en cuenta para fines gubernamentales o de políticas

de inversión.

Los Municipios y las comunidades locales son fuertes referencias de apoyo institucional en la temática ambiental minera, que tienen una estructura muy participativa. Brindaron apoyo técnico en la generación de talleres participativos donde participaron miembros del propio gobierno municipal, de Organizaciones Territoriales de Base y comunidades, algunos miembros de cooperativas mineras y grupos de base autodenominados “agromineros”.

El proceso diálogo es la búsqueda de concertar intereses, de tal manera de evitar los conflictos y generar dinámicas de sostenibilidad de los sistemas ambientales y sociales.

#### ***2.4.2.2 Entidades de Gestión de Cuenca***

En la conformación de una entidad de gestión de cuenca es deseable contar con una amplia convocatoria de usuarios del agua de la cuenca. A continuación se mencionan algunos de los elementos y entidades que conformarían esta mesa:

##### **Entidades de cuenca: funciones típicas**

- Promover el debate sobre temas de agua.
- Consultar y coordinar a los actores.
- Opinar sobre nuevas solicitudes de permisos, autorizaciones y derechos de uso o descarga.
- Elaborar planes de uso del agua a escala local.
- Concertar con la autoridad de aguas las medidas para enfrentar situaciones de escasez.
- Arbitrar conflictos relacionados con el agua.
- Recopilar información y realizar inspecciones.

##### **Entidades de cuenca: conformación típica**

Representantes de:

- Autoridad de aguas
- Organismos públicos relacionados con el agua
- Gobiernos locales
- Usuarios de agua
- Deben estar representados todos los tipos de uso de agua que se hagan en la cuenca, (minería, agricultura, generación hidroeléctrica, sanitaria etc.).

Además, en algunos casos:

- Participan otros actores (organizaciones no gubernamentales, universidades, etc.).
- Se reserva un nivel mínimo de representación para los usuarios de agua (el óptimo sería un reparto de 1/3 para cada ente - Administración, Usuarios, Actores- , para tener un modelo 3/3).



## **Desafíos**

- Sin un apoyo funcionalmente relevante desde el nivel nacional, no es factible crear entidades sostenibles a nivel de cuenca.
- Las funciones de la mesa deben definirse en forma precisa y articularse bien con las funciones de otros organismos y otros niveles de gobierno, para evitar oposición y conflictos.
- La creación de una mesa de agua debería llevar aparejada la creación de una secretaria técnica de mesa de agua, para asesoramiento técnico.
- Procedimientos para asegurar que el proceso de toma de decisiones no se paralice por falta de cooperación de un grupo o sector.
- Hay que asegurar representación equilibrada de los actores relevantes (modelo 3/3).
- La sola creación de entidades de cuenca no significa que vayan a (o podrán) participar todos los actores, asegurando con ello un equilibrio de intereses o decisiones más racionales.
- Se debe estimular y facilitar la participación de los actores interesados dándoles acceso a financiamiento, información y posibilidad de formular y expresar opiniones y posiciones.
- Sin el adecuado financiamiento, representantes de sectores sin recursos propios tendrán una capacidad disminuida respecto a sus pares con solvencia financiera (apropiación del sistema).

Pautas para lograr una la participación exitosa de los grupos de interés en la gestión de riesgos ecológicos se dan por ejemplo en Glicker, 2000. Para mayor información sobre las entidades de gestión de cuenca se puede obtener mayor profundidad en Molle, 2001; Cooper, 2004; Jouravlev, 2003 o Dourojeanni, 2000, 2002.

### ***2.4.2.3 Proyectos Mineros y Poblaciones Cercanas***

Como ya fue señalado anteriormente, el desarrollo de las actividades mineras implica un impacto social y económico en la población del área de influencia. Sin embargo, es posible señalar que en la mayoría de los casos la instalación de un proyecto minero provoca una migración desde las actividades económicas primarias hacia una tercerización de las actividades dentro de la población. Este fenómeno afectará en forma diferenciada, dependiendo de la consolidación de los espacios ocupados por la actividad minera y el arraigo de las actividades originarias de los habitantes.

**Áreas despobladas:** El desarrollo de la actividad minera puede implicar en algunos casos la generación de un polo de atracción de la población, además de la propiamente relacionada con la actividad minera, generándose eventualmente nuevos centros poblados, tanto planificados (Salvador, Calama en el norte de Chile), como al margen de la planificación.

**Zonas pobladas:** El desarrollo de la actividad minera en zonas pobladas provocará un impacto en ésta, el cual estará directamente relacionado con la cantidad de población y la diversidad de las actividades económicas desarrolladas en esta población.

**Población indígena:** El impacto derivado del desarrollo de proyectos mineros en áreas habitadas

por población indígena tiene relación tanto con el cambio de actividades económicas como con la pérdida de actividades que son parte del patrimonio cultural de una etnia en particular. Este impacto deberá ser evaluado tanto por el especialista en medio social a cargo del proyecto, como por parte de un antropólogo que ponga en valor las actividades realizadas por estos pueblos.

La percepción del proyecto por parte de grupos de interés dentro del área de influencia del proyecto minero puede ser medida a través de la realización de encuestas de opinión, las cuales deben ser cuidadosamente ejecutadas por equipos entrenados, con el fin de no interferir en las opiniones verdaderas en estas encuestas.

La interacción con los grupos de interés por parte de las empresas mineras debe ser realizada bajo una política de “puertas abiertas”, con interlocutores claramente reconocibles tanto desde la empresa como desde los grupos de interés participantes. El mensaje entregado a estos grupos debe ser claro, ajeno a tecnicismos propios de la actividad minera y entregado por personas claramente reconocibles y validadas por los grupos de interés.

Varios de los proyectos mineros en los países sudamericanos han tenido una relación difícil con las comunidades vecinas del proyecto, y con algunas Organizaciones No Gubernamentales (ONG) que apoyan las demandas de las comunidades o que son opuestas a cualquier intervención que impacte al medio ambiente. En las zonas áridas, el uso de los recursos hídricos, esencial para la agricultura / ganadería y para el proceso del mineral, es un tema potencialmente conflictivo que necesita un trato cuidadoso por ambas partes.

Dentro de las actividades realizadas con la comunidad es posible realizar evaluaciones preceptuales de ésta, corroborándolas con antecedentes derivados de las conversaciones realizadas con los representantes de los grupos de interés.

En caso de bajar la aceptación por parte de los grupos de interés, la empresa minera debe proponer canales de acercamiento, escuchando las solicitudes de los grupos, y evaluando al mismo tiempo las propuestas y/o medidas efectuadas ante la comunidad.

### **2.4.3 Monitorización**

La monitorización de las variables, sean ambientales u operacionales, de las actividades asociadas con la minería son esenciales para la gestión de las operaciones y sirven para verificar su eficiencia y el cumplimiento con las expectativas operacionales y económicas, y también su cumplimiento con las normas y sus compromisos con respecto al medio ambiente físico y social. Pautas generales sobre la monitorización ambiental se encuentran en EPA, 1995.

Debido a las condiciones de aridez, los programas de monitorización en las zonas áridas y semiáridas deben ser diseñados considerando que el transporte fluvial de contaminantes puede ser limitado en términos de distancia, pero con la acumulación de los contaminantes en las riberas de los cursos fluviales. Durante los períodos de lluvias, las aguas levantan estas acumulaciones de sedimentos para transportarlos como frentes de alta concentraciones de contaminantes.

La monitorización consiste en la medición de manera periódica de los indicadores involucrados en la actividad elegida. Los indicadores pueden relacionarse con los aspectos físicos, tales como

la temperatura o el volumen, aspectos químicos tales como la acidez o el contenido de sólidos disueltos o de metales en el agua de descarga, hasta aspectos sociales como la percepción favorable o desfavorable de las comunidades hacia la empresa minera que se encuentre realizando la faena en algún lugar determinado. Para un gran número de casos, los indicadores están relacionados con una norma que estipula, por ejemplo, una concentración máxima. En el caso de la calidad del aire o agua, los límites normalmente corresponden a límites legales o normas específicas. En el caso de la biología o la biodiversidad, los controles deben tener relación con la línea base (condiciones pre-existentes a la actividad) en términos de especies o números de individuos de una especie dentro de un área o localidad. En otros casos, la empresa misma puede elegir un indicador para medir su desempeño en un área específica. Un ejemplo sería el uso del agua en términos de litros o metros cúbicos por tonelada de concentrado producido o la variación (positiva o negativa) de los caudales a las comunidades vecinas de la operación minera durante la vida de la mina.

Para evaluar el impacto ambiental de un proyecto sobre la calidad del agua es importante no solo considerar la concentración de contaminantes (expresada por ejemplo en mg/L), sino también la carga (expresada por ejemplo en kg/día; ver sección 3.3.2).

Una buena gestión de los recursos siempre necesita indicadores para cumplir con una de las políticas fundamentales de gestión, la de mejora continua.

En regiones áridas y semiáridas, la demanda de agua por parte de las operaciones mineras entra en competencia directa con otros usos por la limitación del recurso. Esto hace muy importante conocer los caudales sustraídos, su localización y el uso al que son destinados a lo largo de las distintas estaciones del año, dado que pueden existir grandes variaciones estacionales.

El control ambiental no se debe convertir en algo que haga inviable la rentabilidad de un proyecto, sino que debe ser una herramienta para lograr una buena gestión ambiental, la cual debe estar sujeta a monitorización, mantenimiento y auditorías periódicas con el fin de controlar su efectividad. Existe una variedad de métodos que se pueden usar para controlar las fuentes de contaminación en la industria minera, y mantener sus características dentro de los límites establecidos por el lugar. La flexibilidad en la aproximación al diseño y desempeño del proyecto es crítica para lograr controles que sean tecnológica y económicamente factibles.

Un programa de control apropiado puede entregar datos que permitan verificar la magnitud de ciertos impactos difíciles de predecir, y de esta manera detectar alteraciones no previstas en la evaluación ambiental, debiéndose adoptar nuevas medidas correctoras.

### **Caso Peruano: Monitorización Participativa (Empresa Minera – Comunidad) de Recursos Hídricos (Labor, 2008)**

En el Perú se ha adoptado el concepto de Monitoreo Ambiental Participativo, proceso que promueve la participación conjunta de la sociedad civil, en especial de las comunidades, las empresas mineras y el Estado, en una serie de acciones que contribuyen a la prevención, control y mitigación de los impactos ambientales negativos ocasionados por la minería. A continuación se presenta una experiencia de la monitorización participativa:

## MONITORIZACIÓN PARTICIPATIVA

**Caso Aruntani (Región Moquegua, Perú):** En el año 2006, luego de una serie de altercados y tenso relacionamiento entre la empresa Aruntani S.A.C. (mediana minería de oro) con su mina Tucari y las comunidades de Titire, Auntaya y Jancopujo, se constituye la Mesa de Diálogo denominada “Grupo de Trabajo para el caso Aruntani”, a iniciativa de la Comisión de Recursos naturales y Gestión de Medio Ambiente de Gobierno Regional de Moquegua. Tuvo como objetivo central “promover la mejora de las relaciones entre empresa y comunidades del área de influencia de sus operaciones mineras, haciéndolas armónicas y que promuevan el desarrollo sostenible entre la actividad minera y las comunidades”. Se logró la implementación de un programa de Desarrollo Sostenible, que tiene en cuenta la problemática ambiental y las necesidades socioeconómicas de las tres comunidades del área de influencia de la mina.

Se desarrolló una experiencia de Monitoreo Ambiental Participativa dentro del cual incluyeron las siguientes actividades:

- Implementación del muestreo y monitoreo de la calidad de agua y aire del entorno de la Mina Tucari, a fin de determinar y garantizar la protección del medio ambiente del área natural local.
- Caracterización inicial a fin de definir la química del agua para todos los flujos asociados a la mina, proporcionando una línea base con el propósito de determinar objetivos razonables referentes a la calidad del agua y mejorar el programa de monitoreo a largo plazo.
- Controlar la calidad de agua de efluentes y el impacto ambiental, asegurando que se cumpla con los objetivos de calidad.
- Controlar la calidad del aire y el impacto en las áreas pobladas y cercanas a la operación minera, evaluando que se cumpla con los objetivos de calidad.

La metodología empleada fue la siguiente:

- Las fechas de monitorización fueron consensuadas por el grupo técnico analizando los diferentes factores sociales y climáticos que permitan la participación de todos los entes involucrados.
- Las comunidades a través de su asesor técnico contactaron al laboratorio certificado para que realice el muestreo de acuerdo a protocolos establecidos.
- El personal del laboratorio acordó previa coordinación en fecha y hora designada, hizo la instalación de los equipos de aire y muestreo, proceso que durara 24 horas, para las muestras de agua realizaron la toma de muestras y el correspondiente etiquetado y preservación de las muestras según el parámetro a analizar.
- La empresa minera fue el responsable del transporte y seguridad de los equipos, y cubrió los gastos concernientes a transporte y alimentación de los integrantes del grupo de monitorización desde Moquegua hasta la mina, así como del retorno. También pagó los costes de los análisis.

Los resultados logrados indicaron que en todos los puntos y monitoreos realizados, las concentraciones de cianuro, el parámetro de mayor preocupación para la población, se encontraron por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP). Solamente en uno de los puntos de monitoreo de agua se excedieron los Estándares de Calidad del Agua y/o LMP; la variable en cuestión fue Aceites y Grasas en un área fuera del ámbito de la mina.

Es importante señalar que durante el proceso las partes fueron generando confianza. Al finalizar la

experiencia, en diciembre 2007, el proceso culminó con la suscripción de un acto de acuerdos. Son compromisos explícitos de la empresa para apoyar la implementación de los principales proyectos de desarrollo de la comunidad, siendo necesario continuar con la experiencia de monitoreo a fin de mantener el relacionamiento y transparencia que necesitan ambos actores.

#### 2.4.3.1 Plan de Monitorización durante la Fase de Exploración

La monitorización sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos durante la fase de exploración tiene como objetivo obtener datos que serán de utilidad para una correcta gestión de los mismos en las fases subsiguientes (ver Figura 2.6).

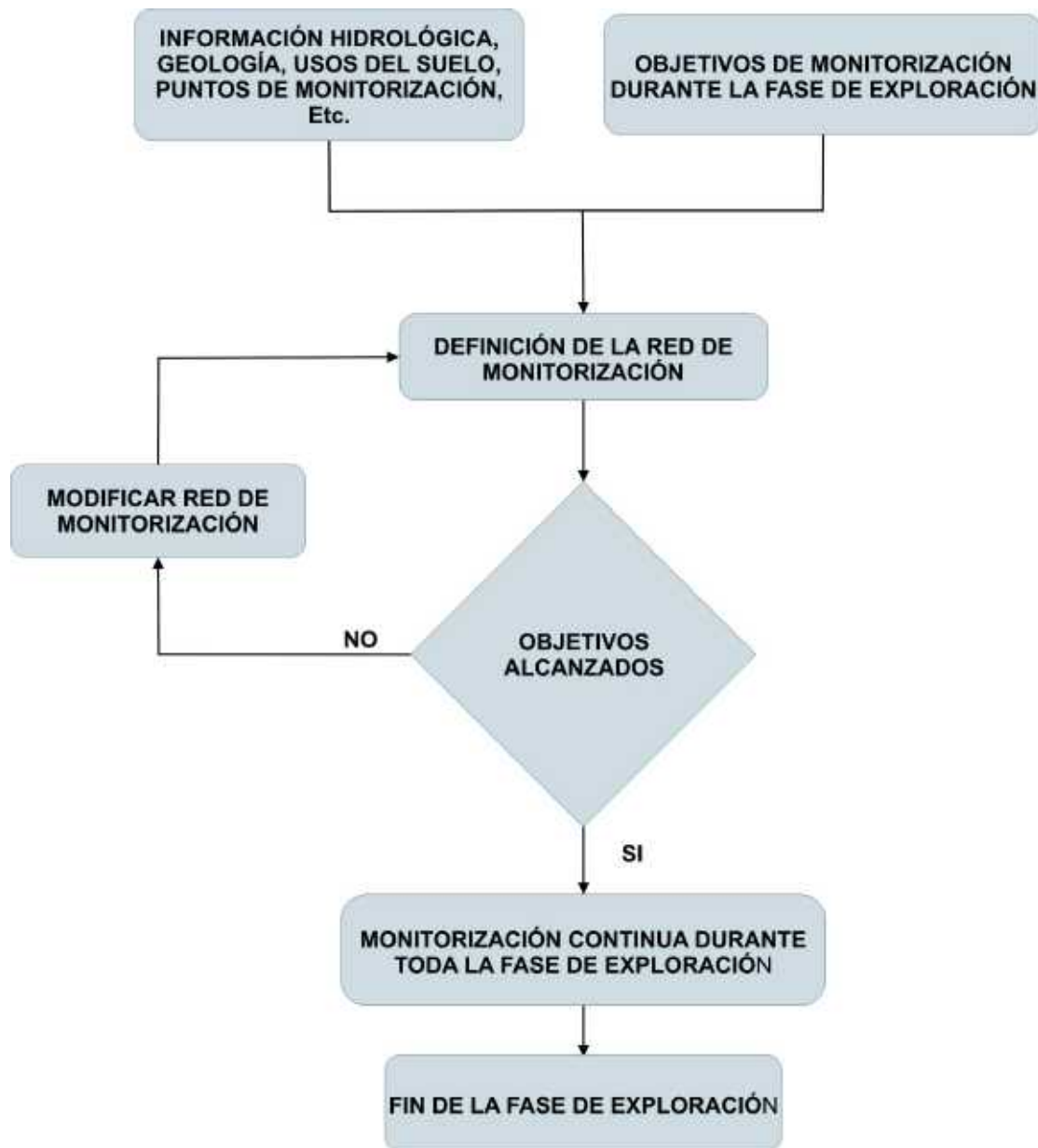


Figura 2.6 Diagrama de Monitorización durante la Fase de Exploración.

Esta monitorización está dirigida a obtener la información necesaria para las siguientes actividades:

1. Ubicar los vertederos de manera que no afecten a los cauces superficiales ni a los acuíferos.
2. Evaluar las características hidrológicas de los cauces superficiales.
3. Evaluar las características de los sistemas acuíferos.

Área a monitorizar:

La zona a monitorizar incluirá como mínimo el área que será ocupada por la mina y las zonas adyacentes. La base geomorfológica para seleccionar un área adecuada vendrá definida por la cuenca hidrográfica que drena el área de la mina, dado que deben de ser tenidas en cuenta todas las entradas y salidas de agua. Las localizaciones de la mina (hueco de explotación o bocamina), las oficinas, la planta de tratamiento así como la balsa de lodos que serán usadas durante la vida de la mina deben ser consideradas con respecto a la cuenca de drenaje.

Dentro del plan de monitorización se deberán incluir:

1. Variables climatológicas – precipitación, (diaria), intensidad, temperatura, humedad relativa, evaporación, viento (velocidad y dirección)
2. Hidrología - caudales
3. Hidrogeología – niveles en pozos y sondeos, manantiales
4. Hidroquímica – calidad de agua superficial y subterránea
5. Índices socioeconómicos

Los datos obtenidos con la red de monitorización permitirán fijar los niveles de referencia para realizar la línea de base ambiental, tan importante para definir el estado de la cuenca antes del comienzo de la actividad extractiva por parte del operador minero, y fijar así los niveles de restauración a los que se debe de llegar en el momento del cierre de la mina.

#### ***2.4.3.2 Monitorización durante la Fase de Explotación***

Los objetivos de control o monitorización durante esta fase incluyen (ver Figura 2.7):

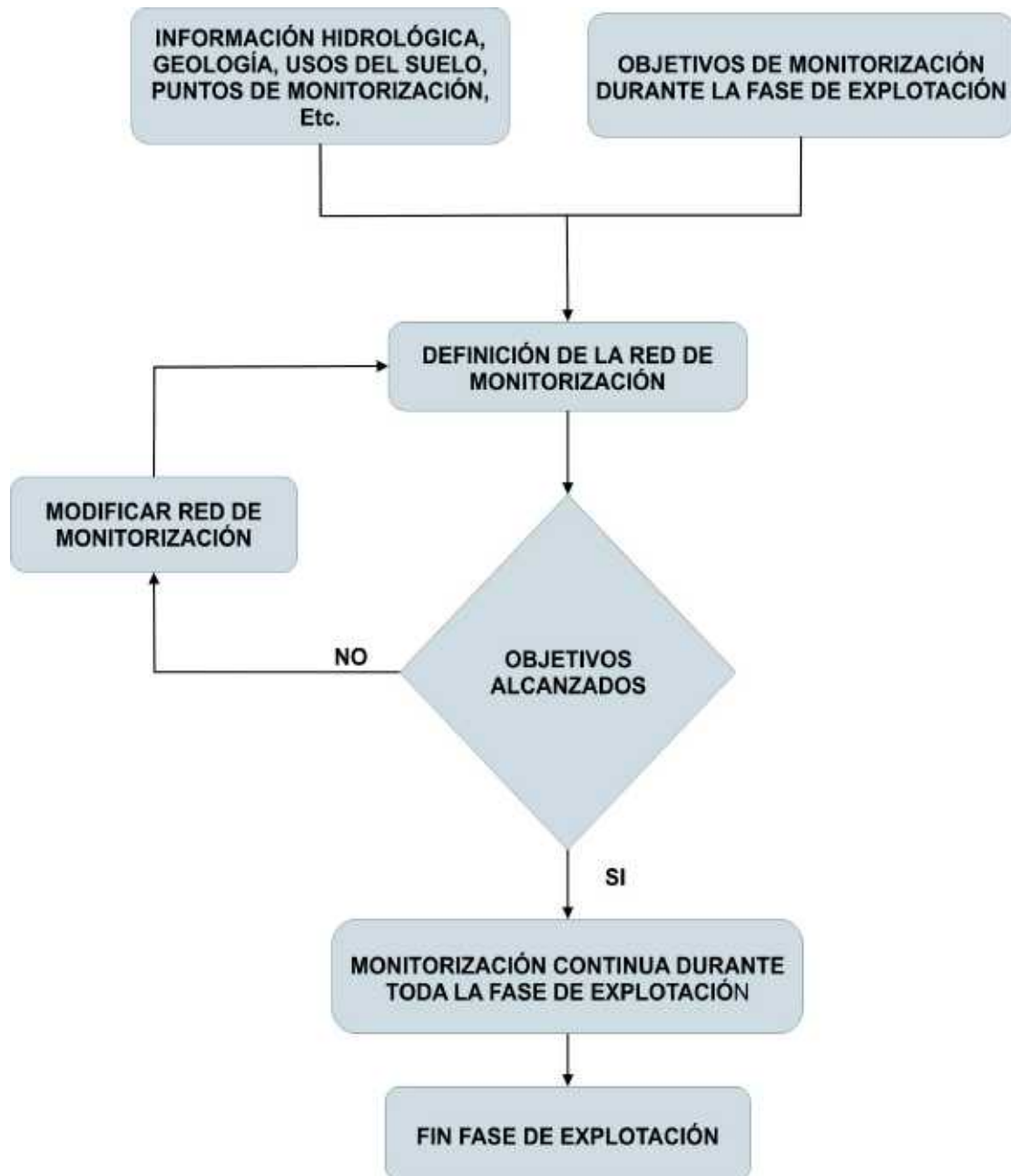
1. Asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental.
2. Asegurar que los volúmenes de agua utilizados y/o extraídos estén de acuerdo a derecho.
3. Validar los datos de algún modelo hidrológico y/o hidrogeológico que haya sido usado en la etapa de EIA del proyecto en curso.
4. Proveer al operador de la mina de información sobre los usos del agua para una adecuada gestión del recurso.
5. Recopilar información para a futuras operaciones en el área de estudio.

Área a monitorizar:

En esta fase del ciclo de vida de la operación minera se debería mantener monitorizado como míni-

mo el mismo área que en la fase de exploración, pero añadiendo puntos de monitorización nuevos en las áreas que van a ser ocupadas durante los próximos dos años, aunque esto depende del tipo de explotación, la intensidad del proceso y los efectos sobre las aguas superficiales y subterráneas. También se puede reducir el área a monitorizar, e incrementar los datos tomados (intensidad y frecuencia), al área próxima a la mina.

Durante esta fase comienza el control y monitorización de las balsas de lodos y las escombreras, para asegurar la estabilidad de sus taludes. Este control debe continuar durante las fases subsiguientes del ciclo de vida de la operación minera, dado que es necesario asegurar su estabilidad estructural durante la fase post-cierre.



*Figura 2.7 Esquema de la Fase de Monitorización durante la Explotación de la Mina*

### 2.4.3.3 Monitorización durante la Fase de Cierre y Post-Cierre

Los objetivos de control o monitorización durante esta fase incluyen (ver Figura 2.8):

1. Asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental.
2. Proveer al operador de la mina de información sobre los posibles impactos y la evolución de su mitigación.
3. Asegurar la estabilidad de las estructuras de retención.

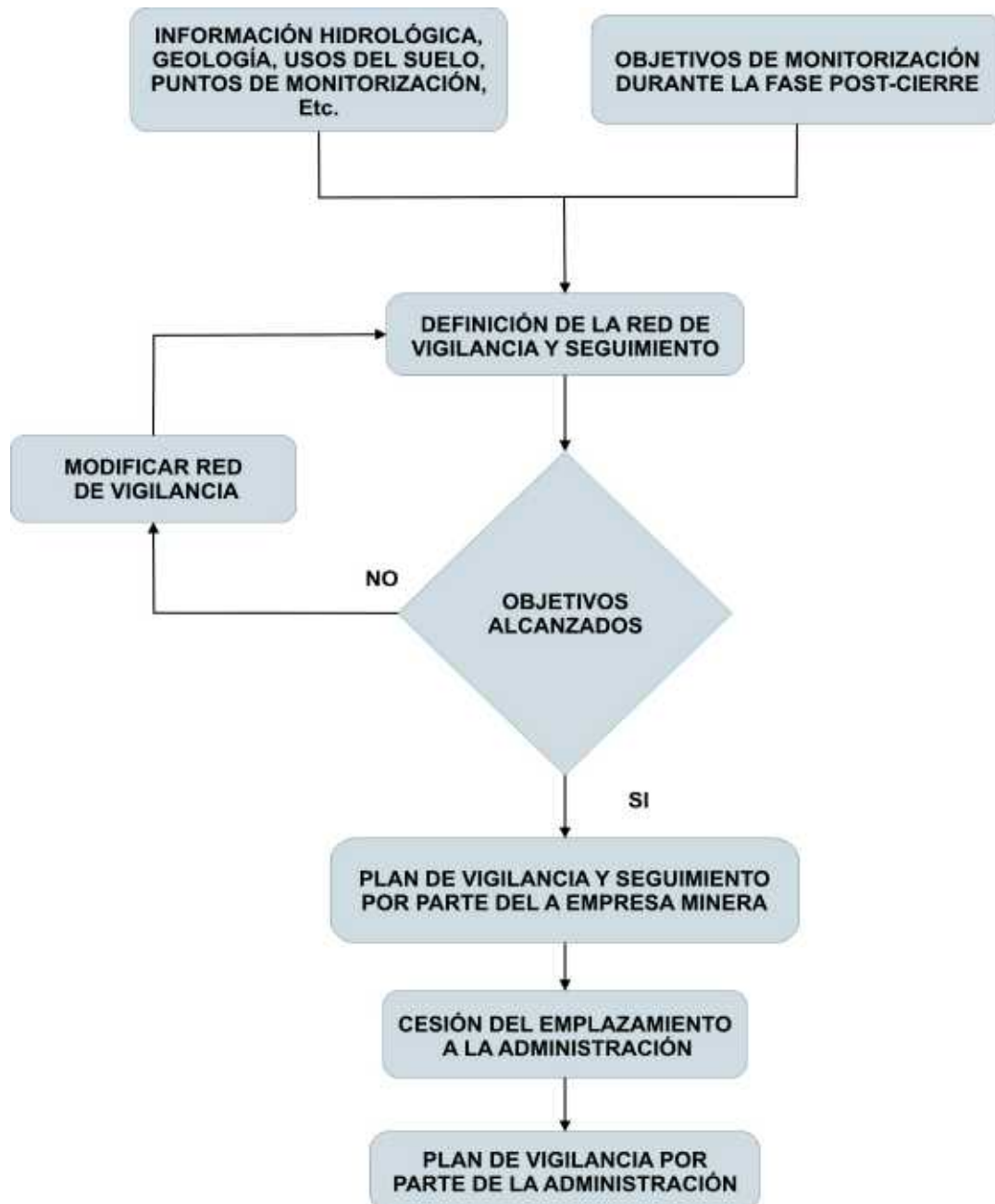


Figura 2.8 Esquema de la Fase de Monitorización durante el Cierre y Post-Cierre de una Mina



Área a monitorizar:

En esta fase algunos autores sugieren mantener monitorizado el área usando únicamente un punto aguas arriba y uno aguas abajo, dado el coste que implica la monitorización. También se pueden mantener los puntos que se han añadido en las fases anteriores para facilitar la integración de los datos y evaluar la evolución del área.

#### **2.4.4 Registro de Resultados e Informes**

La toma y recolección de datos meteorológicos, hidrológicos e hidroquímicos no tiene validez a largo plazo sin la existencia de un sistema adecuado para gestionar y mantener los registros. Todo el trabajo y la inversión realizados serían inútiles si las series de datos no tuviesen una adecuada gestión en plazos más allá de la vida de los proyectos. Es necesaria la creación de un sistema de gestión de los mismos adecuado a las necesidades de gestión de las operaciones mineras en la cuenca.

Los registros de datos y los análisis correspondientes no sólo sirven para un registro histórico de las condiciones en el pasado, también sirven para una planificación futura a la luz de las tendencias de los diferentes parámetros, por ejemplo, un aumento o disminución de la precipitación. Es importante también tener registros para defender el desempeño de la empresa minera frente a descalificaciones o denuncias respecto a la calidad o cantidad de agua usada en la operación.

El análisis de los resultados se puede realizar de acuerdo a los recursos disponibles – desde los simples gráficos que muestran los resultados y sus tendencias hasta análisis estadísticos y el uso de modelos computacionales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD) para mostrar la distribución espacial de los resultados (ver apartados 2.5.1 y 2.5.2).

#### **2.4.5 Transparencia de Resultados y Gestión**

En la mayoría de las jurisdicciones los usuarios comerciales de agua (mineros, agricultores etc.) están obligados a presentar informes periódicos a las autoridades. Aunque tales informes son “públicos”, muchas veces no entran al dominio público o son muy breves y no presentan la información de manera asimilable al público.

La Iniciativa Global de Información (Global Reporting Initiative<sup>11</sup>- GRI) fue establecida por grupos de especialistas internacionales que piensan que la divulgación de información sobre el desempeño económico, ambiental y social de una empresa es tan importante como los informes financieros, y es vital para el éxito de la organización. Se ha creado un sistema de divulgación voluntaria para que el público interesado sea informado con respecto a los diferentes aspectos de la gestión de una empresa. Con la disponibilidad de Internet para distribuir tales informes, el costo de distribución de los resultados y análisis es mínimo. Los beneficios de hacer pública la información respecto al uso de agua, conservación y protección ambiental son obvios para la imagen de la empresa u organización.

El nivel de detalle de los informes emitidos dentro del ámbito de la GRI puede variar de acuerdo al tamaño y los recursos de la empresa u organización, pero indican una voluntad de recibir y contestar

11 [www.globalreporting.org/Home](http://www.globalreporting.org/Home)

a consultas sobre su desempeño. Al mismo tiempo es importante que las consultas estén presentadas de forma seria y no provocativa, para que promuevan el diálogo y la mejora.

Para crear transparencia y aceptación de la operación, el balance de agua de la cuenca, los estudios hidrogeológicos y la demanda de agua de la operación minera deben ser publicados antes de la fase de consulta pública del estudio de impacto ambiental (EIA).

Estos estudios deberían contribuir a la formación de un repositorio público de información hidrogeológica que permite una mejor gestión a nivel de cuenca. Todos los países deberían aspirar a la capacitación de sus administraciones para que la adjudicación de derechos ocurra dentro de este marco de gestión pública de una cuenca.

#### **2.4.6 Planes de Respuesta ante Emergencias**

El tema de Planes de Respuesta ante Emergencias en la industria minera va mucho más allá del alcance de la presente guía, y en esta oportunidad se limita a considerar los principales riesgos asociados con la gestión de agua. El programa APELL (Awareness and Preparedness for Emergencies at a Local Level) del ICMM, en curso desde el año 2003, y el producto de este programa “Buenas Prácticas de Preparación y Respuesta ante Emergencias” (Emery, 2005) dan más detalles sobre este tema.

En resumen, los requisitos de Planes de Respuesta ante Emergencias que una organización debe cumplir bajo la norma ISO 14000<sup>12</sup> son:

- Establecer, implementar y mantener procedimientos para identificar situaciones de emergencia y accidentes potenciales que podrían afectar al medio ambiente y cómo responder a éstos.
- Responder a situaciones de emergencia y accidentes reales y, prevenir o mitigar los impactos ambientales que puedan relacionarse con ellos.
- Revisar periódicamente y modificar, cuando sea necesario, sus procedimientos de respuesta y reparación para emergencias, especialmente luego de haber ocurrido accidentes o situaciones de emergencia.
- Poner a prueba dichos procedimientos periódicamente donde sea aplicable.

La historia de la minería contiene varias situaciones que han resultado en accidentes y emergencias, desafortunadamente a veces con la pérdida de vidas, y que han involucrado al agua; incluyendo el colapso de presas de relaves, la ruptura de tuberías, el deslizamiento de balsas de lodos durante períodos de fuertes lluvias, o la contaminación del agua por el derrame de productos químicos usados en el proceso del mineral.

El Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD) ha publicado una serie de guías para el diseño, construcción y cierre seguro de presas de lodos disponible en su web ([www.icold-cigb.net](http://www.icold-cigb.net)). Existen muchas otras guías, tales como: “Una Guía para el Manejo de Presas de Lodos” (“A Guide to the Management of Tailings Facilities”; MAC, 1998), publicada por la Asociación de Minería de Canadá y Design of Tailings Dams and Impoundments (Davies et al, 2002).

Los puntos clave para la preparación e implementación de Planes de Emergencia son:

12 [www.iso14000-iso14001-environmental-management.com/](http://www.iso14000-iso14001-environmental-management.com/)

- Reconocer la importancia de tener un Plan de Respuesta ante Emergencias
- Asegurar que todas las diferentes secciones de la operación estén involucrados en la preparación del Plan.
- Asegurar que los servicios de emergencia locales estén involucrados en la preparación del Plan.
- Involucrar a las personas o comunidades vecinos que podrían ser afectadas por una emergencia.
- Publicar el Plan y capacitar al personal en los diferentes aspectos, asegurando que cada persona sabe cuál es su rol y accionar ante diferentes emergencias.
- Realizar simulaciones de emergencias; involucrar los servicios de emergencia y la población local.
- Reconocer que no todas las emergencias resultan de fallas abruptas. También hay causas relacionadas con la falta de mantenimiento, o la falta de un adecuado análisis de datos de monitoreo que indican un deterioro en la condición de algún componente.

### 2.4.7 Auditoría de los Sistemas de Gestión

La auditoría es una herramienta y piedra angular de cualquier sistema de gestión, usada para confirmar el seguimiento y verificación de una implementación eficaz del Plan de Gestión de Agua. La auditoría, sea interna o externa, debe ser realizada por personal independiente de la gestión del agua, con experiencia en auditorías y de preferencia con experiencia también en el tema a ser auditado.

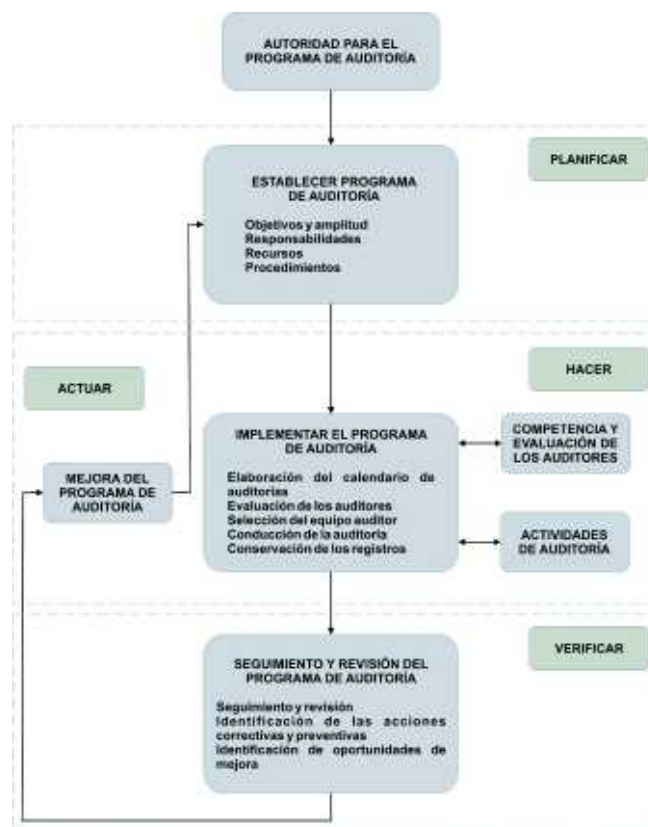


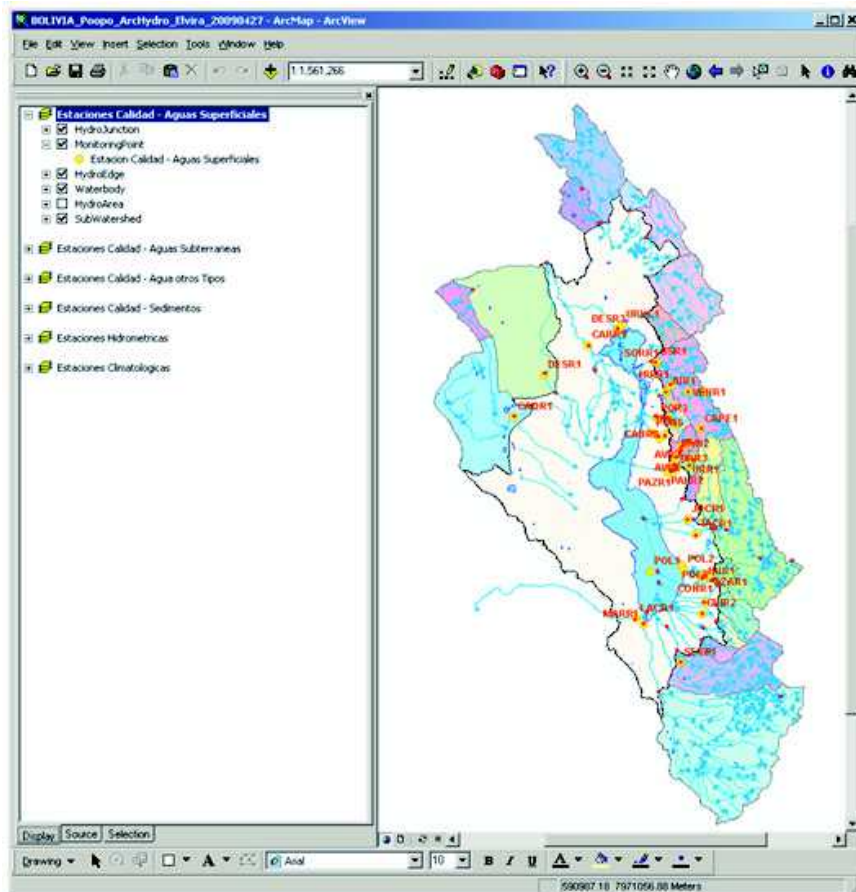
Figura 2.9 Diagrama de Flujo de un Programa de Auditoría

La Norma Internacional ISO 19011:2002<sup>13</sup> da las directrices para la auditoría de los sistemas de gestión de la calidad y/o de gestión ambiental. Comprende encontrar las evidencias de la auditoría, principalmente registros u otra información verificables y pertinentes para los criterios de la auditoría, y la evaluación de la evidencia frente a los criterios, para llegar así a las conclusiones de la auditoría (Figura 2.9).

## 2.5 Herramientas

### 2.5.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La gestión del agua depende de la información que tiene un componente espacial. Tradicionalmente, la información geográfica fue gestionada por los sistemas cartográficos, que más tarde se convirtieron en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Un SIG difiere de un mapa o un software cartográfico, que tiene una base de datos de información geográfica que permite crear vínculos entre los diferentes tipos (o “capas”) de datos y la capacidad de consultar estos datos espaciales. Además, los atributos alfanuméricos pueden ser manejados fácilmente mediante un sistema integrado de gestión de bases de datos (Database Management Systems, DBMS). Los SIG se utilizan para estructurar, ordenar, representar y analizar las bases de datos espacialmente (Figura 2.10).



*Figura 2.10 S.I.G de la Cuenca del Lago Poopó, Bolivia, del Proyecto CAMINAR*

13 [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=31169](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=31169)

El crecimiento y los avances de las tecnologías de información y bases de datos han proporcionado la posibilidad de acceder y gestionar eficazmente grandes volúmenes de información, incrementando con ello la calidad de la gestión de los recursos naturales. El uso de SIGs y de sistemas de gestión de bases de datos relacionales (Relational Database Management Systems, RDBMS) permite que todo el conjunto de datos relativos a cada cuenca (por ejemplo la hidrología, la ecología, la topografía, el clima o los factores socioeconómicos, etc.) pueda ser analizado simultáneamente. Los SIG y RDBMS añaden valor a los conjuntos de datos mediante la agrupación y la conversión en una base de datos normalizada que puede acomodar simultáneamente datos geográficos y alfanuméricos. Este proceso también puede mejorar la calidad de los datos mediante la aplicación de procedimientos de validación que permiten detectar y corregir las incoherencias en elementos individuales o en conjuntos de datos.

Desde el inicio del proyecto minero, durante el levantamiento de la línea de base, en la evaluación del proyecto minero, su seguimiento ambiental, operacional, cierre y post cierre los SIG presentan un gran apoyo para el manejo de la información, el análisis del territorio, del entorno y los elementos del medio, la toma de decisiones, modelación y simulación de escenarios, entre otros.

### 2.5.2 Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD)

Un número creciente de ejemplos indican que un proceso integrado de toma de decisiones puede ayudar a desarrollar soluciones más realistas en la gestión de los recursos y ecosistemas de zonas áridas y semiáridas. Esto se logra mediante el uso de herramientas de evaluación que puedan examinar las consecuencias de escenarios alternativos de gestión. Los Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD) son sistemas interactivos informáticos, que integran sistemas de información geográfica (SIG) con modelos que describen y predicen procesos (Figura 2.11), con el objetivo de ayudar a los decisores a utilizar datos y modelos para identificar y resolver problemas y para tomar decisiones.

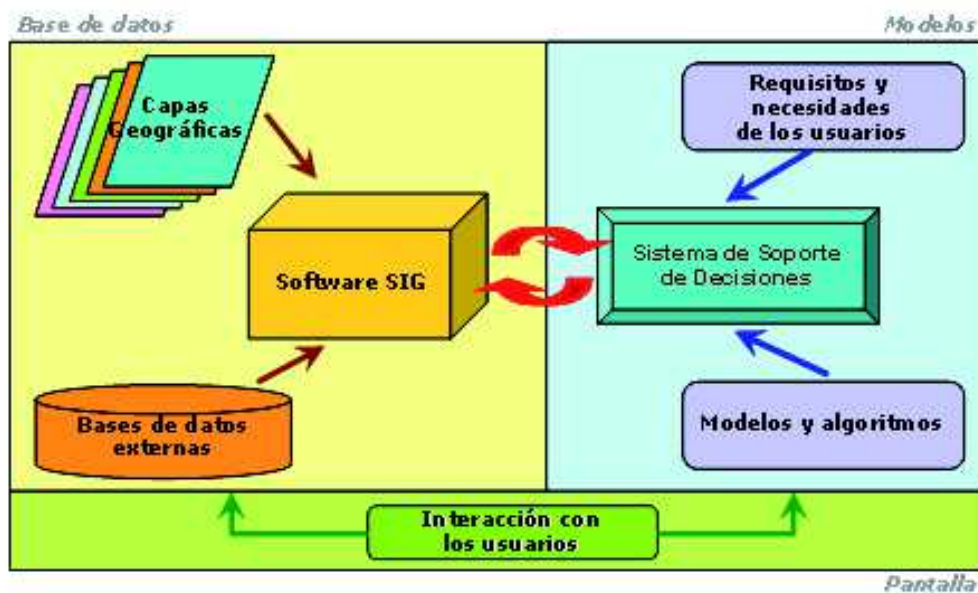


Figura 2.11 Esquema de un Sistema de Soporte de Decisiones

Los SSD tienen cuatro características principales:

1. Incorporan datos y modelos,
2. Son diseñados para asistir a los gerentes en los procesos de decisión,
3. No reemplazan, sino que apoyan a la toma de decisiones, y
4. Su objetivo es mejorar la efectividad de las decisiones, no la eficiencia con la que esas decisiones son tomadas.

Se trata de sistemas que permiten contestar preguntas específicas basadas en la combinación de dos elementos:

1. Una base de datos que recopila distintas capas de información geo-referenciada (SIG), por ejemplo de imágenes satelitales, cartografía de recursos naturales, catastro, resultados de investigaciones, información proveniente de encuestas e informantes calificados, etc.
2. Uno o más modelos de simulación que integran distintas capas de información y calculan resultados de acuerdo a las necesidades de los usuarios. Estos modelos pueden variar en su complejidad, pero son los que permiten aprovechar la base de datos y relacionar la información existente.

El crecimiento y los avances de las tecnologías de información y bases de datos han proporcionado la capacidad de gestionar eficazmente el acceso a una cantidad cada vez mayor de información, aumentando así la calidad de la gestión y de las decisiones. Los SSD para la gestión de recursos hídricos son a menudo asociados con la optimización de los modelos matemáticos que manejan un gran número de variables y restricciones en función del nivel de detalle requerido para lograr una representación adecuada del sistema. El objetivo es alcanzar un nivel de representación del sistema de agua que permite el análisis de hipótesis para la planificación y gestión, bajo condiciones de incertidumbre acerca de los acontecimientos climáticos o hidrológicos.

Los SSD se centran en decisiones concretas y su objetivo es el de apoyar en lugar de sustituir al usuario en el procesos de toma de decisiones. Se utilizan para obtener una decisión política más sólida, al unir las ventajas de la revisión, validación e integración de un gran volumen de datos (proporcionados por el módulo de base de datos), con la aplicación de modelos robustos de simulación.

La selección de modelos apropiados es un proceso interactivo, donde las soluciones propuestas son ensayadas, analizadas y revisadas. Para cada caso concreto, el modelo o los modelos que se desarrollan deben representar un compromiso equilibrado entre las necesidades y las especificaciones de los usuarios, las características hidráulicas e hidrológicas de las cuencas, y la disponibilidad de datos.

Desde los años 80 se han ido desarrollando SSD con aplicación a problemas de gestión de recursos hídricos en la minería (p. ej. Kaden et al., 1985, Nawalany et al., 2003). Dentro del proyecto CAMINAR se han desarrollado cuatro SSD para responder a las diferentes problemáticas encontradas en las tres cuencas de los estudios de caso:

- Una interfaz de usuario para el manejo de datos de monitoreo de la cuenca del Lago Po-

opó, Oruro, Bolivia. La interfaz permite la generación automática de tablas y gráficos de resultados, y de mapas de distribución de parámetros y contaminantes, para facilitar la interpretación de los datos.

- Un modelo WRAP (Water Rights Analysis Package; Wurbs, 2009), para la gestión de derechos de uso del agua en la cuenca del Río Chili, Arequipa, Perú. El modelo toma en consideración la capacidad de almacenamiento de agua existente, la cantidad total requerida por los usuarios, el tipo de uso, el flujo ambiental y otros factores que pueden afectar la disponibilidad del agua todavía no asignada a un proyecto en particular.
- Un modelo HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran, Bicknell et al., 1997) para la simulación de flujos de agua y propagación de contaminantes en las aguas superficiales de la cuenca del Río Elqui, La Serena, Chile.
- Un modelo MODFLOW (Harbaugh, 2005) para simular el flujo de aguas subterráneas en la cuenca Pan de Azúcar, Chile, y evaluar su balance y disponibilidad para distintos usos.

## 2.6 Evaluación y Control de Riesgos

En la gestión del agua en cuencas mineras, especialmente en zonas áridas y semiáridas, se presenta una amplia variedad de hechos y situaciones potencialmente peligrosas que se producen y deben gestionarse bajo condiciones de diversos grados de incertidumbre y que ocasionan consecuencias indeseables para el éxito de un desarrollo minero. En efecto, estos hechos y situaciones suelen dar origen a diferentes tipos y grados de riesgos que ponen en peligro la efectividad de las instalaciones y procesos mineros, el eficiente y oportuno uso de los recursos hídricos necesarios y la misma sustentabilidad ambiental del proyecto minero.

Los efectos del uso del recurso hídrico en una cuenca por las explotaciones y procesos mineros constituyen también un hecho incierto y un potencial de riesgo. No siempre es posible prever las consecuencias ambientales de tal uso y evaluarlas con certeza, tanto en la fase de toma de obtención de permisos y de toma de decisiones iniciales, como en la fase de la gestión minera propiamente dicha.

Por otro lado, la operación de las instalaciones y equipos propios de un proyecto minero, así como los procesos de producción involucrados en tales proyectos, quedan también afectos a situaciones de incertidumbre y peligro, relacionados directa o indirectamente con el medio hídrico, que pueden poner en riesgo la seguridad de las personas, la protección de las inversiones y la sostenibilidad ambiental de las cuencas en la zona de influencia del proyecto minero.

La manera adecuada de evaluar y tratar los aspectos de “incertidumbre”, “peligro” y “riesgo” en los casos señalados, es primero a través del uso del concepto de “probabilidad” y finalmente mediante la aplicación de los conceptos y metodologías de Evaluación y Gestión de Riesgos.

En la sección siguiente se incluyen algunas definiciones y conceptos básicos sobre estos aspectos. Posteriormente, se identifican los agentes generadores de situaciones de peligro y riesgo que son de interés en la gestión minera con respecto a la gestión o manejo del agua en las cuencas respectivas, haciendo referencia a las correspondientes consecuencias en las diversas actividades e instalaciones relacionadas con el recurso hídrico y que están asociadas a tales peligros. Finalmente, se tratarán

las actividades que componen la “Gestión del Riesgo” y se explicarán brevemente las herramientas y metodologías relacionadas con la Evaluación y Gestión de Riesgos.

### **2.6.1 Tipos de Riesgos**

Los grandes usuarios de agua, tales como empresas internacionales mineras, para quienes el agua representa un valor esencial para su operación, han desarrollado estrategias para gestionar los riesgos y garantizar la continuidad del suministro. Un ejemplo de tal gestión es la empresa Río Tinto, que define los riesgos en cuatro áreas principales:

- Riesgos estratégicos: relacionados con situaciones o cambios legislativos, políticos y sociales.
- Riesgos operacionales: relacionados a la interrupción del suministro por eventos climáticos o problemas técnicos.
- Riesgos a terceros: interferencia al suministro a terceros o su contaminación debido a fallos operacionales.
- Riesgos al medio ambiente: aprovechamiento del recurso sin tener conocimiento de las necesidades del medio ambiente y sus ecosistemas.

#### ***2.6.1.1 Riesgos Estratégicos***

El riesgo estratégico depende mucho de la estabilidad política y administrativa del país, su historia, experiencia económica y social respecto a la industria minera así como a la gestión del agua entre sus diferentes usuarios. Los países que tienen grandes oscilaciones y cambios de política en minería e industria y las grandes inversiones necesarias, o que han tenido malas experiencias en el pasado con tales operaciones, se presentan como países con un mayor riesgo. Una población o comunidad que ha sufrido escasez de agua o cuyos recursos hídricos han sido contaminados por operaciones mineras o industriales anteriores, van a tener mucha precaución frente al emplazamiento de nuevas operaciones. Para evitar problemas por malentendidos, muchas empresas mineras llegan a un acuerdo, llamado licencia social, con las comunidades potencialmente afectadas por una mina, respecto a su operación y sus características tales como su forma y tamaño, y los beneficios para las comunidades que resultarían de la operación, antes de realizar cualquier desarrollo del proyecto. La licencia social puede contener acuerdos sobre el uso del agua. Con la licencia social, el riesgo estratégico se reduce, pero se necesita una estricta adhesión a los términos del acuerdo y un diálogo continuo respecto a las modificaciones que inevitablemente van a ocurrir durante el desarrollo del proyecto.

El Consejo Internacional de Metalurgia y Minería (ICMM), que reúne a muchas de las empresas de minería y metales líderes en el mundo, reconoce la importancia de obtener y mantener la licencia social para sus operaciones, y en algunos países como el Perú es obligatorio por ley tenerla.

#### ***2.6.1.2 Riesgos Operacionales***

##### **Gestión y mitigación de riesgos**

Los riesgos operacionales se pueden identificar y es posible tener procedimientos para evitarlos o mitigarlos. Los procedimientos para gestionar los riesgos operacionales deben ser incorporados en



cursos de capacitación, manuales de operación y planes de emergencia.

### **Cambios climáticos**

Dentro de los riesgos operacionales son los relacionados con el clima y la precipitación, tanto por la disminución en el suministro a causa de una sequía, como por un aumento genere daños por inundación o crecidas causadas por tormentas inesperadas. Los análisis hidrográficos que dependen de las estadísticas históricas deben incluir factores de seguridad mayores debido a los cambios climáticos pronosticados, especialmente para proyectos con larga vida útil (20 años o más).

### **Fallos de equipos**

Normalmente existen pólizas de seguros que cubren los costes de materiales y producción perdidos en caso de fallos en los equipos que afecten a la producción. Es decir, hay mecanismos para pasar el riesgo a terceros.

#### ***2.6.1.3 Riesgos a Terceros***

Aunque a escala global y nacional la industria minera es un usuario minoritario del agua, a escala local, especialmente en zonas áridas y semiáridas, una operación minera puede ser el mayor usuario. Un aspecto clave en la estrategia de gestión hídrica es el trato y participación con otros usuarios y grupos de interesados. Estudios previos a la puesta en marcha de la operación deben incluir modelos de los potenciales riesgos a terceros. Por ejemplo, los estudios hidrogeológicos deben identificar zonas donde una disminución en el nivel freático por bombeo de un acuífero pueda dar como resultado el cese del flujo de los manantiales, afectando a la disponibilidad del suministro de agua para los animales de una comunidad. Aunque el impacto directo puede ser menor, las consecuencias que generan las malas relaciones con la comunidad y la mala publicidad pueden generar un impacto mayor o hasta catastrófico para la empresa.

#### ***2.6.1.4 Riesgos al Medio Ambiente***

Los estudios ambientales previos a la operación (cualquiera que sea) deben proveer un catastro de las condiciones de línea base y una identificación de sistemas o elementos ambientales frágiles. Los riesgos al medio ambiente pueden ser de tipo rápido, debido a algún accidente (por ejemplo un derrame de soluciones tóxicas), o más graduales hasta casi imperceptibles, en el caso de filtraciones menores de diques de relaves. En el primer caso, la monitorización post-incidente es importante para confirmar la eficacia de las acciones correctivas tomadas, y en el caso de deterioros graduales de un componente ambiental (por ejemplo, reducción en la presencia de un especie de fauna), la monitorización de rutina (mensual o semestral) puede detectar los cambios y permitir un análisis más profundo y la implementación de medidas correctivas.

### **2.6.2 Conceptos y Definiciones Básicas**

- Incertidumbre. La incertidumbre de un hecho o de su consecuencia, se expresa como una probabilidad o frecuencia de su ocurrencia, es decir un número comprendido entre cero y uno en el primer caso (usualmente expresado como porcentaje), o en la segunda opción, una cifra que expresa el número de veces de su posible ocurrencia en un deter-

minado período promedio de tiempo.

- **Riesgo y Peligro.** En el ámbito de la Evaluación y Gestión de Riesgo, el término “Riesgo”, (“risk”), debe diferenciarse del término “Peligro” (“hazard”). En este contexto, el término “Peligro” corresponde a un evento potencialmente dañino, que puede dar origen a una situación o consecuencia considerada perjudicial o adversa (un daño). El concepto “Riesgo” considera, expresa y evalúa la combinación de la probabilidad que ocurra un peligro, con la severidad o magnitud de la consecuencia que produce.
- **Exposición al Peligro.** Un sistema tiene más o menos Exposición a un Peligro, según el número de veces, el intervalo de tiempo o el modo en que su objetivo de desempeño queda susceptible de afectarse por un evento o agente peligroso.
- **Vulnerabilidad.** La vulnerabilidad de un sistema tiene relación con el grado, facilidad o magnitud en que un evento peligroso puede afectarlo en su objetivo o en su desempeño. Las condiciones que podrían contribuir a la vulnerabilidad de un sistema o de uno de sus componentes incluyen:
  - La existencia de una amenaza física o de la naturaleza, que depende de la ubicación del sistema (sequías, sismos, etc.).
  - El estado de conservación y mantenimiento de un componente o subsistema, (por ejemplo, equipos de bombeo de agua y sistemas de conducción de agua antiguos y/o mal mantenidos).
  - Situación legal débil (Según país o zona remota). Situación de derechos de agua. Inscripción de títulos de propiedad y derechos de paso).
  - Falta de personal capacitado para una adecuada operación y mantenimiento de sistemas de suministro de agua.
- **Evaluación de Riesgos.** Es la actividad que combina la evaluación de la probabilidad de los daños o consecuencias de un evento o situación peligrosa con la evaluación de la magnitud o grado de dicha consecuencia. La Gestión (o Manejo) de Riesgos es el procedimiento o actividad que comprende conjuntamente los procesos de la Evaluación de Riesgos, y el proceso de Toma de Decisiones (“decision making”), con el objetivo de analizar, evaluar y seleccionar alternativas de acción para hacer frente a dichos riesgos, tales como: mitigarlos, remediarlos, compensarlos o transferirlos.

### **2.6.3 Origen y Generación de Peligros y Riesgos**

El manejo del agua en el desarrollo minero en una cuenca árida o semiárida tiene relación con los aspectos que se resumen a continuación (Tabla 2.10). Cada una de estas actividades y aspectos, o un conjunto de ellos, puede estar afecto a situaciones de riesgo, dadas las incertidumbres propias de su evaluación, implementación y funcionamiento, y debido a las situaciones inciertas de peligro potencial que ocurren en un desarrollo minero. Estos riesgos pueden ilustrarse y resumirse en la tabla 2.11.

*Tabla 2.10 Aspectos del Suministro de Agua que Generan Potenciales Riesgos a la Operación*

ASPECTO	ACCION
Evaluación del recurso hídrico requerido	Estudios hidrológicos Estudios hidrogeológicos.
Obtención de derechos de aprovechamiento de aguas.	Solicitud de los derechos de aprovechamiento Tramites y oposición de terceros Resolución de asignación del derecho
Sistemas de abastecimiento de agua	Obras de captación y conducción Obras elevación y equipos de bombeo Obras de almacenamiento, regulación y entrega Plantas de tratamiento por especificación de la calidad del agua
Control de eventos hidrológicos e hidrometeorológicos extremos.	Obras y sistemas de drenaje superficial y subterráneo Obras de defensa ribereña de cauces naturales y artificiales
Uso de agua para el transporte de relaves	Tuberías y canales Obras y sistemas de control (piscinas de emergencia y válvulas)
Disposición de aguas residuales y relaves	Balsas de lodos Obras de control y disposición final a cauces y terrenos
Recirculación de aguas de proceso	Plantas de bombeo Tuberías
Control del agua en operaciones y sistemas de cierre y abandono de instalaciones.	Vertederos de seguridad Drenes y barreras de intercepción Canales de intercepción y desvío

**Tabla 2.11 Identificación de Peligros y Riesgos**

Origen del Peligro	Situación de Riesgo	Tipo de Riesgo (Consecuencias)
Fenómenos de la Naturaleza	Eventos hidrológicos extremos (crecidas, sequías, tormentas)	Destrucción de obras hidráulicas y otras instalaciones; escasez de agua; paralización de operaciones
	Avalanchas de nieve	Destrucción de obras y equipos hidráulicos
	Sismos	Suspensión suministro y recirculación del agua
	Deslizamientos	Imagen de inseguridad en la empresa
	Corrientes de barro, aluviones	Riesgos a las personas
Aspectos Tecnológicos	Incendio en instalaciones	Pérdidas físicas; accidentes laborales
	Averías en los equipos	Suspensión del suministro de agua
	Fallos en los equipos	Pérdidas de producción
Aspectos Humanos	Extracciones no autorizadas	Disminución del suministro de agua
	Contaminación antrópica	Litigios con personas, empresas o instituciones. Suspensión del suministro de agua; mayores costos de inversión y operación
	Actos maliciosos y antisociales	
	Errores de diseño y operación	
Aspectos Legales e Institucionales	Responsabilidad civil	Litigios
	Nuevas regulaciones y normativas	Plazos de ejecución e implementación
	Caducidad de permisos	Cambios de producción, de obras y equipos
	Oposición a solicitud de derechos de agua	Demoras, no obtención de derechos de agua
	Otorgamiento de derechos de agua	Demoras; restricciones en recursos hídricos

En resumen, los tipos de riesgos y las consecuencias señaladas en la tabla 2.11 suelen afectar los plazos de ejecución del proyecto minero, los costes de inversión y operación, los niveles de producción programados, las relaciones con personas, instituciones y la comunidad y el logro de los obje-

tivos buscados para el manejo ambientalmente sostenible del agua relacionada con el proyecto.

Por otro lado, la misma gestión del agua requerida por las actividades mineras en una cuenca árida o semiárida puede generar una serie de riesgos en otras actividades de la cuenca en general y en la disponibilidad y calidad de sus recursos hídricos existentes para otros usuarios.

Las consecuencias en un proyecto minero y los posibles riesgos a terceros que pueden generar por si solas las actividades de manejo del agua del proyecto o de eventuales riesgos de falla de los sistemas asociados, tienen en general relación con:

- Litigios; posible revocación o suspensión del permiso ambiental u otra autorización
- Multas de la autoridad pertinente
- Compensaciones monetarias a terceros
- Demoras y aumentos de plazos previstos
- Incurrir en costos de reposición y/o reparación de obras y equipos públicos o de privados
- Limitaciones y restricciones al uso del agua en la cuenca, e incluso no otorgamientos de los derechos de aprovechamientos solicitados inicialmente.

**Tabla 2.12 Potenciales Riesgos al Recurso Hídrico Generados en la Cuenca y para Terceros**

Actividades del Manejo del Agua	Posibles Riesgos en la Cuenca y para Terceros
Proceso de Obtención de Derechos de Aprovechamiento de Aguas	Agotamiento de los recursos hídricos en la cuenca. Restricciones en el uso del agua a terceros, efectos ambientales
Captación de Agua Superficial	Variaciones y disminución del caudal de vertientes; descenso de niveles del agua en norias y pozos
Captación de Agua Subterránea	Descensos de los niveles de la napa freática
Almacenamiento y Regulación del Agua	Inundación de terrenos; ruptura de recubrimientos  Deposición sedimentos; vertimientos incontrolados
Conducción del Agua	Erosiones y socavaciones por ruptura de conductos; interferencia con infraestructura existente
Drenaje Superficial	Intercepción de escorrentía superficial utilizable por terceros

Actividades del Manejo del Agua	Posibles Riesgos en la Cuenca y para Terceros
Intercepción de escorrentía superficial utilizable por terceros	Intercepción recursos de agua subterráneas de terceros
Protección de riberas	Degradación de lechos aguas abajo y de otras riberas
Transporte de Relaves	Contaminación y socavaciones por ruptura de conducciones
Deposición de Relaves	Intercepción de aguas subterráneas; contaminación hídrica
	Ocupación de terrenos; afectación de flora y fauna
Recirculación de Agua	Erosión y socavación por ruptura de ductos
Cierre o abandono de tranques de Relaves	Crecidas incontroladas, contaminación
Disposición final de aguas en cauces y cuerpos hídricos	Contaminación hídrica; crecidas de agua en cauces

## 2.6.4 El Proceso de Gestión de Riesgos

La Gestión de Riesgos es un proceso que se compone de diversas actividades, las cuales pueden retroalimentarse de acuerdo a ciertos criterios, resultados y objetivos de cada caso. Tal proceso y sus componentes principales se resumen e ilustran a continuación en la Figura 2.12.

Cada uno de los componentes o actividades principales del proceso de Gestión de Riesgos que se indican en la Figura anterior contiene las siguientes actividades parciales:

Formulación del Problema (1):

- Integrar toda la información disponible posible
- Identificar las situaciones o factores que se decida proteger de riesgo
- Identificar los modelos de cálculo y análisis que se usarán
- Formular el Plan de Análisis que se seguirá

Evaluación de los Riesgos (2):

- Identificar los peligros que afectarían al sistema o actividad de manejo del agua

- Identificación de las consecuencias que ocasionaría cada peligro
- Caracterización del grado de Vulnerabilidad de cada sistema
- Evaluación y asignación de probabilidades de cada consecuencia

#### Caracterización de los Riesgos (3):

- Valorización y / o Cuantificación de los Riesgos
- Procesos de “Screening”, o tamizado y preselección de riesgos más importantes
- Análisis y evaluaciones adicionales más detalladas sobre riesgos preseleccionados
- Priorización de Riesgos

#### Calificación (o Apreciación) de los Riesgos (4):

- Identificación y Evaluación de las opciones de Gestión y Control de los riesgos: tales como: mitigarlos; remediarlos; compensarlos; prevenirlos; transferirlos (p.ej. pólizas de seguros, instrumentos financieros)
- Consideración de otras tecnologías o modalidades de manejo del agua
- Consideración de factores económicos, sociales, políticos y legales
- Identificación y caracterización de criterios de aceptabilidad de los riesgos

#### Análisis del Riesgo (5):

- Evaluación de los Costes de las medidas de Control de Riesgos y de los Costos de las Consecuencias que originarían los Riesgos
- Comparación de costes de control de Riesgos versus costo de la consecuencias
- Comparación de la intensidad o magnitud del riesgo con criterios de aceptabilidad de los mismos

El uso del término “coste”, no necesariamente implica evaluaciones monetarias de los mismos, sino que puede evaluarse en términos cualitativos descriptivos y con comparaciones relativas entre ellos.

Si los costos de controlar el riesgo son menores que los costos de las consecuencias, o si la magnitud del riesgo es aceptable, se controla o se acepta el riesgo, procediendo luego sólo con un monitoreo y seguimiento de las actividades de manejo del agua, lo que eventualmente, según sus resultados, puede significar volver a repetir el proceso de gestión de riesgo a partir de la actividad de Evaluación de Riesgos o simplemente continuar con el seguimiento. Por el contrario, si los costos de control del riesgo son altos y mayores al costo de las consecuencias que pudieren producirse, o si la magnitud del riesgo no es aceptable de acuerdo a cierto criterio preestablecido, se debe necesariamente efectuar un re-análisis del proceso, eventualmente, readecuando las actividades de manejo del agua y/o los sistemas de control de riesgo, hasta que su magnitud sea razonablemente aceptable bajo ciertos criterios y pautas preestablecidas, o el costo de las consecuencias sea menor.

Se observa en la Figura 2 15 que en cada una de las actividades parciales del proceso, es válido y puede ser conveniente, retrotraer el análisis de alguna etapa del proceso (flechas con líneas de segmento) por lo menos hasta la etapa precedente, con el objeto de efectuar ajustes o re evaluaciones.

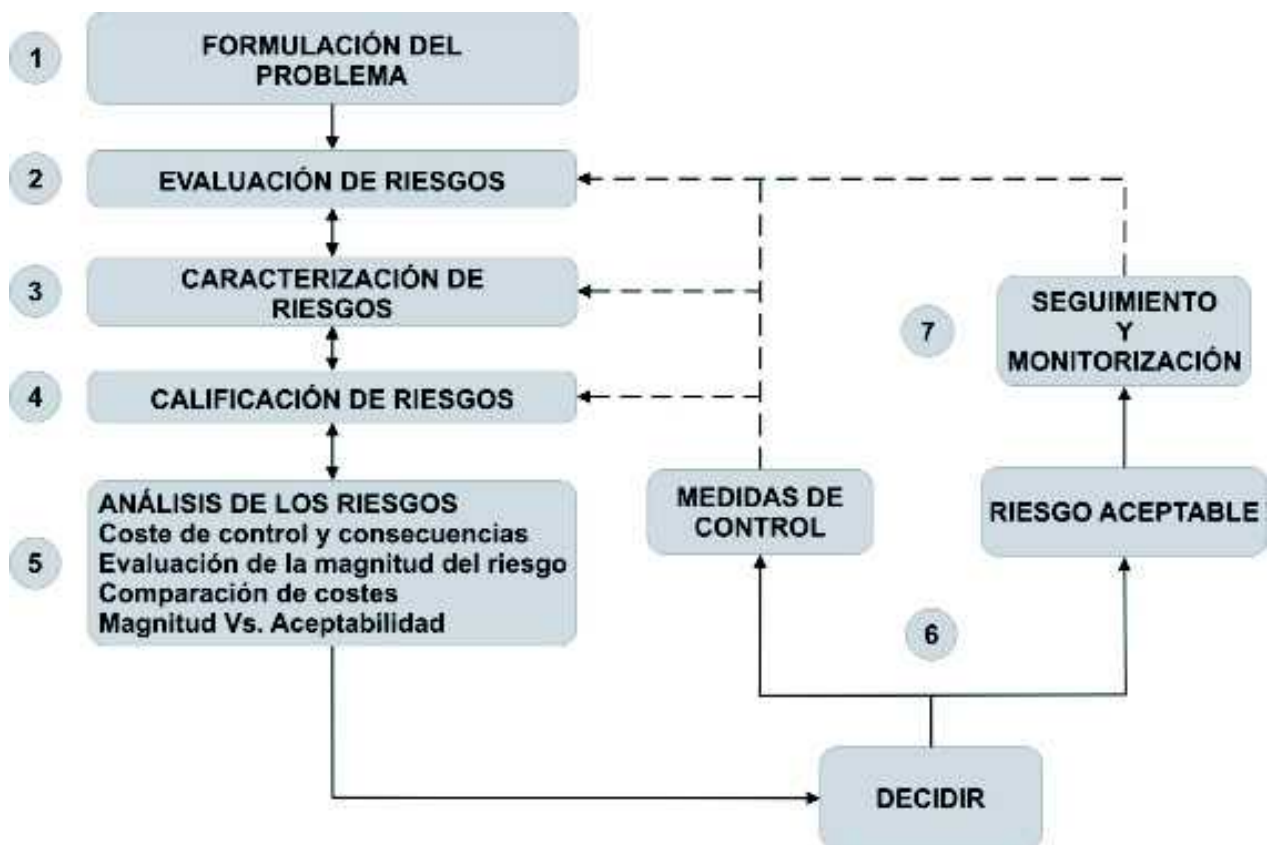


Figura 2.12 Proceso de Análisis y Gestión de Riesgos

## 2.6.5 Herramientas y Metodologías de Análisis de Riesgos

### 2.6.5.1 Índice Básico de la Magnitud del Riesgo.

Se define un índice de la magnitud o intensidad de un riesgo mediante la siguiente relación:

$$R = P \times S$$

en que R corresponde al valor del Índice de la Magnitud del riesgo, P es un número que representa un Índice o Coeficiente que expresa la Probabilidad del Riesgo, y S es el número de un Índice o Coeficiente que expresa la Severidad o intensidad de la Consecuencia resultante. Estos índices se evalúan cualitativamente y expresan numéricamente grados o escalas cualitativas de los componentes de la relación anterior.

Hay varios otros tipos de Índices de la Magnitud del riesgo que se han propuesto para riesgos específicos, y que están basados en la relación anterior y que incorporan índices que expresan la exposición al riesgo del sistema y un índice de su vulnerabilidad.



### 2.6.5.2 Matrices y Mapas de Riesgos

Pueden plantearse dos tipos de Matrices de Riesgos: Matrices de Análisis y Matrices de Consecuencias.

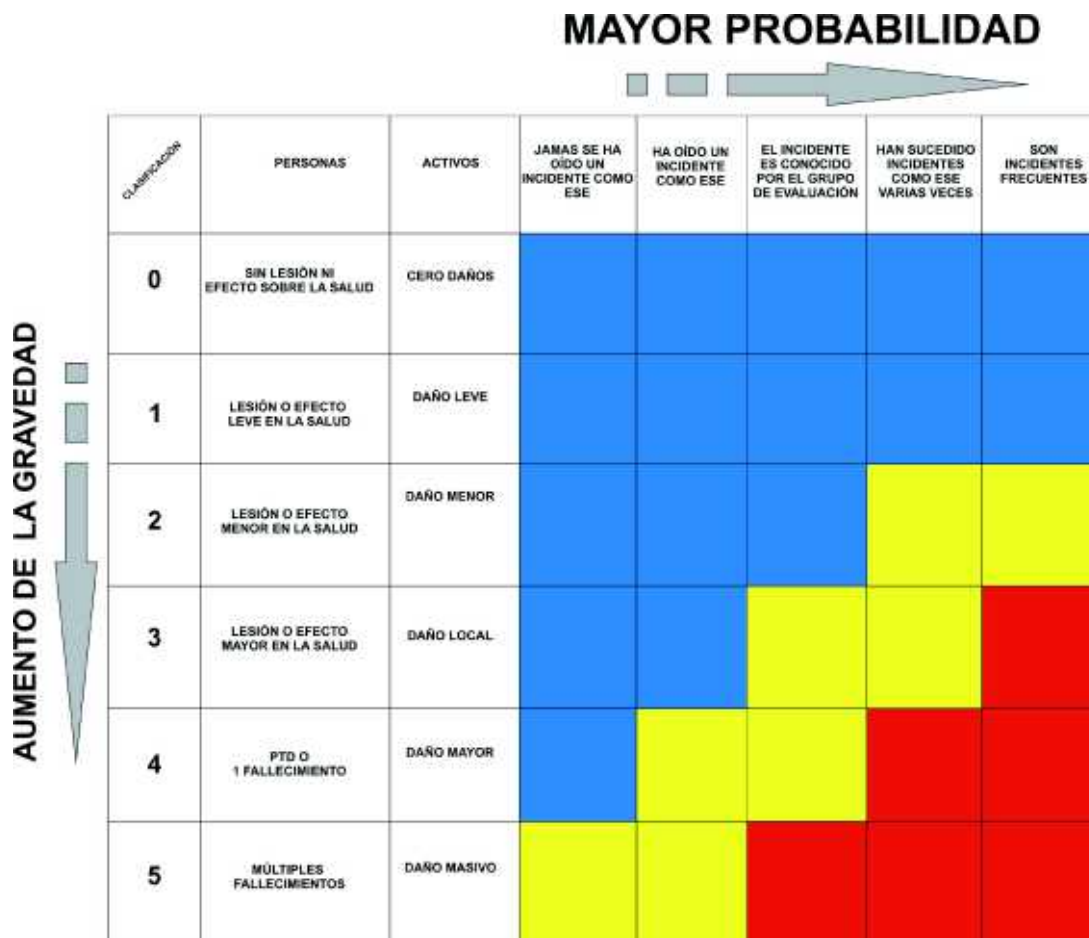


Figura 2.13 Matriz de Análisis de Riesgos

Las Matrices de Análisis representan descriptivamente, en forma tabular (o matricial), la relación de dependencia entre el origen de los distintos tipos de Peligros o Amenazas y los diferentes tipos de Consecuencias o tipos de posibles actividades de manejo que puedan verse afectadas (Figura 2.13).

Las Matrices de Consecuencias corresponden a una representación tabular de la relación entre el grado o categoría de Severidad de cada consecuencia o daño producido por un evento peligroso, con su correspondiente grado o categoría de Probabilidad o Frecuencia de ocurrencia. Estos grados o categorías se expresan por un número entero correspondientes a una descripción cualitativa de los diferentes grados de Severidad y Probabilidad que se han especificado previamente. En la intersección de cada columna y fila de la matriz, se anota el Índice de Magnitud del riesgo que corresponde al producto de los grados de la severidad de la consecuencia y de la probabilidad correspondiente.

Estas matrices permiten clasificar y jerarquizar el grado o categoría de riesgo de los eventos en análisis, priorizarlos en términos relativos, e ilustrar su grado de aceptabilidad.

### 2.6.6 Métodos Cualitativos de Análisis de Riesgos

Los métodos cualitativos están basados en evaluaciones, procedimientos y antecedentes de naturaleza cualitativa (o apreciativa), o a veces semicuantitativa. Estos métodos son los siguientes:

- Análisis Preliminar de Peligros (“hazards”), o método PrHA
- Análisis de Modos de Falla y Efectos, o método FMEA
- Análisis de Peligros y Operatividad, o método HAZOP
- Método “¿Qué pasa si...?” (método “What if”)
- Listas de Comprobación o “Check lists”

El objetivo principal de estos métodos es proceder sistemáticamente a una identificación y caracterización de los eventos peligrosos y de sus consecuencias, junto con relacionarlos con las medidas de control existentes o posibles, y plantear recomendaciones al respecto. Los resultados de los métodos tipo PrHA, FMEA y HAZOP se expresan en tablas donde se pueden identificar las siguientes columnas: Nombre de la actividad de manejo del agua o del sistema en análisis; situaciones u orígenes de riesgos; causas originarias del riesgo; consecuencias posibles; índices de severidad, probabilidad y de la magnitud del riesgo; salvaguardas y controles posibles; recomendaciones; observaciones y comentarios.

El método “What If”, permite expresar en una tabla o lista, las diferentes consecuencias posibles ante diferentes escenarios posibles y alternativos de riesgo o falla. El método de “Check Lists”, expresa y comprueba el grado de cumplimiento de la actividad o sistema en análisis, de las expectativas planteadas o de sus estándares de diseño y regulaciones de conformidad.

### 2.6.7 Métodos Cuantitativos de Análisis de Riesgos

En términos generales estos métodos consisten en evaluar y expresar en forma cuantitativa – es decir en números y unidades conocidas – las probabilidades de los eventos peligrosos y las causas de los riesgos y asimismo expresar la severidad o magnitud de las consecuencias correspondientes, en términos numéricos y objetivos. En estos métodos, es aplicable también la relación básica que expresa un Índice de la Magnitud del Riesgo, (relación  $R = P \times S$ ). La diferencia importante con los métodos cualitativos es que al menos el término P siempre se cuantifica y se procede a evaluaciones de este tipo, sobre la base de los conceptos, reglas y métodos basados en la Teoría de Probabilidades, y las consecuencias se cuantifican en términos objetivos cuantitativos a través de modelos numéricos y/o relaciones funcionales.

Los métodos cuantitativos de análisis de riesgos son básicamente los siguientes:

- Modelos Lógicos
  - Análisis de Árboles de Falla o método FTA (“Failure Tree Analysis”)
  - Análisis de Árboles de Eventos o método ETA (“Event Tree Analysis”)

- Modelos Matemáticos (en general) :
  - Modelos Funcionales o Matemáticos Determinísticos
  - Modelos de Simulación
  - Modelos Probabilísticos (Simulación Montecarlo)

Información de mayor detalle se encuentra por ejemplo en Martínez Ponce de León (2001) o Ayyub (2003).



**GESTIÓN DE AGUA EN LA MINERÍA  
MEDIANA Y GRAN ESCALA EN ZONAS  
ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS**



# 3 GESTIÓN DE AGUA EN LA MINERÍA MEDIANA Y A GRAN ESCALA EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS

## 3.1 Introducción

En la actualidad, y dado el cambio de mentalidad surgido a partir de los años 70 en el concepto de explotación minera, es factible la coexistencia de la actividad minera y el respeto al medio ambiente. Para que ésta sea factible es necesaria una concepción de la actividad extractiva que integre los factores ambientales desde las fases más tempranas del proyecto. Toda Actividad minera debe proyectarse a futuro (a medio o largo plazo) dentro de lo que hoy se entiende como desarrollo sostenible, equilibrando los factores geológicos que definen la ubicación del yacimiento, con los propios de la actividad minera y la preservación de ambiental de la región en la que se halle. La necesidad de la preservación y gestión de los recursos ambientales está basada en el concepto de minería sostenible, que es sustentar lo que nos sostiene, ya que todo da comienzo con la minería (Fernández, 2007). Existe actualmente una corriente de pensamiento en la mayor parte de las compañías mineras que aboga por una conciliación de la eficiencia económica y la calidad de la producción con la preservación de los valores ambientales (Figura 3.1). Se trata pues de integrar, como ya se indico, la prevención de los posibles efectos negativos sobre el medio ambiente en las diferentes etapas de una operación minera, para obtener la gestión de unos recursos necesarios e insustituibles para el desarrollo de la sociedad sin un menoscabo de la calidad ambiental de los entornos donde se ubican las minas.

La imagen de actividad agresiva generadora de grandes impactos medioambientales que ha dado la minería a lo largo del tiempo, y por la que ha sido atacada desde los diversos frentes ambientalistas, ha generado una gran inercia en la sociedad que no ha asimilado todavía que actualmente existen suficientes conocimientos y una tecnología adecuada para prevenir y corregir los impactos que se pudieran generar. Este pasivo sociológico existe todavía como consecuencia de una anterior falta de conciencia ecológica o ambiental en la actividad minera. Ligado a esta carencia tenemos el hecho de que los efectos de la actividad minera en el medioambiente tienen un ciclo de vida largo, si no se los remedia a tiempo.

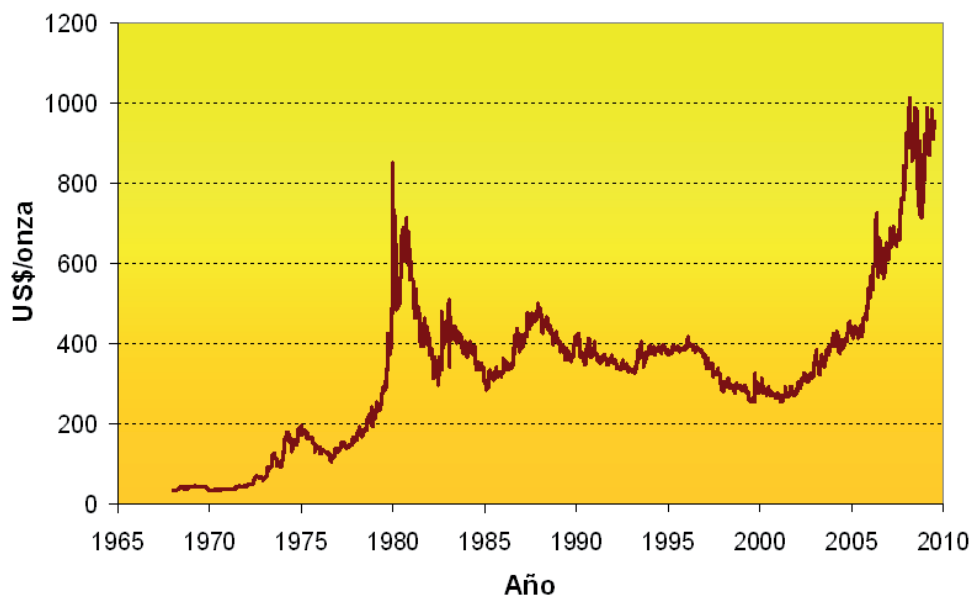
Actualmente existen estrictas normativas en la mayor parte de los países sobre el impacto que puede producir una explotación minera, donde se incluye una serie de reglamentaciones acerca de los vertidos líquidos, emisiones de polvo, ruidos, restauración paisajística, etc., que si bien suponen un elevado coste económico para las empresas mineras e indudablemente han de ser asumidos para llevar a cabo la explotación, ciertamente resultan la mejor publicidad de una actividad integrada en la sostenibilidad de los recursos y el medioambiente.

Las empresas mineras de mediano y gran tamaño tienen una alta receptividad a la casuística ambiental propia de su actividad, y se muestran muy activas en los procesos de I+D+i para el desarrollo sostenible de la actividad minera. Prueba de ello son las inversiones millonarias en investigación en remediación ambiental, como el proyecto GARD de INAP financiado por algunas de las empresas mineras internacionales importantes.



**Figura 3.1 Interrelación de Diversos Aspectos con la Minería**

A pesar de la disponibilidad de las empresas para adoptar una línea de actuación ambiental, incluso por encima del marco legal del país de operación, existen una serie de elementos limitantes (Baretino, Obis y Espí, 2005). En algunas ocasiones se deben a factores financieros, dada la volubilidad de los mercados de los metales a lo largo del tiempo (ver Figura 3.2), o en el caso de operaciones que llevan en funcionamiento periodos de tiempo muy largos, como es el caso de mina San José (Figura 3.3) en Oruro (Bolivia), se deben al peso de los pasivos ambientales que limita las actuaciones futuras. En el caso de estos pasivos arrastrados por las empresas, el orden de prelación es la remediación del pasivo por el daño que causa al medio físico y social, quedando relegadas las actuaciones futuras. Las modificaciones de carácter normativo frecuentes en el sector, y la lentitud de las administraciones para adaptarse a ellas, unidas a una dilución de las competencias entre los diversos entes de la administración pública encargadas de aplicarlas, generan una dificultad añadida a la hora de implantar una nueva operación minera.



**Figura 3.2 Precio de Oro de los Últimos 41 años, en US\$ por Onza Troy. Fuente: [www.lbma.org.uk/stats/goldfixg](http://www.lbma.org.uk/stats/goldfixg)**

En la minería pequeña y artesanal, durante períodos de precios bajos de metales, muchas veces las operaciones están abandonadas, y luego cuando suben los precios, retoman las actividades. No hay capital de trabajo suficiente para mantener la operación durante períodos económicos difíciles, y menos todavía para implementar medidas de protección ambiental.

Para comprender adecuadamente cuales son los pilares básicos de la gestión de los impactos mineros es necesario conocer el ciclo de vida de una mina. Las operaciones mineras tienen un ciclo de vida largo, y en las diversas fases que ocurren durante el proceso de desarrollo del proyecto, los impactos generados son muy distintos. Además se ha de tener en cuenta la especial casuística de las zonas áridas y semiáridas de Sudamérica, en las cuales conviven la moderna minería de mediana y gran escala, con una minería artesanal, arcaica y sin los medios necesarios para una integración ambiental correcta.



*Figura 3.3 Bocamina de Mina San José, Oruro (Bolivia)*

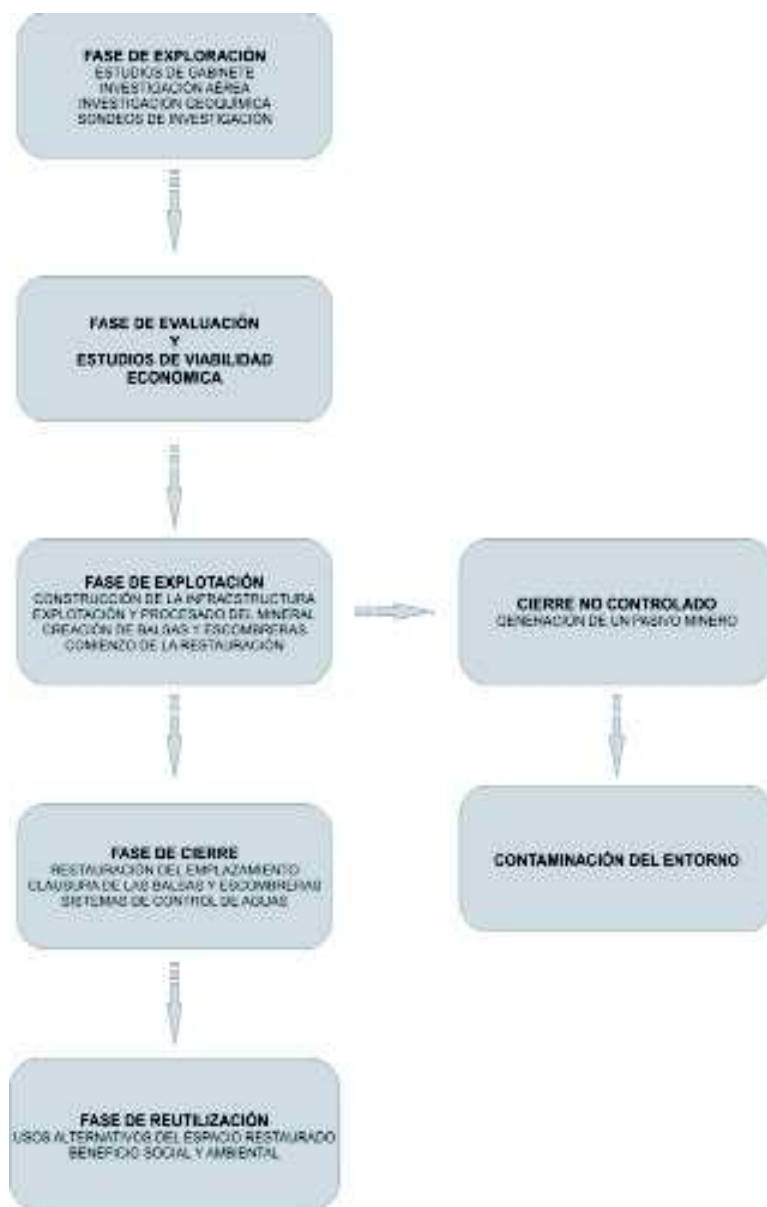
De esta especial convivencia y diversidad nace la necesidad de dividir o separar en este punto la evaluación del ciclo de vida de la actividad minera. Por un lado, por las características intrínsecas de la minería artesanal que carece de un ciclo de vida lógico, no existen las fases de prospección y evaluación económica ni ambiental, y la fase de cierre es, en este caso, un abandono no planificado de la explotación. Por otro lado, es inviable actualmente que los pequeños núcleos mineros artesanales, típicamente las cooperativas mineras en Bolivia, puedan cumplir la normativa ambiental,



dado que carecen de la financiación adecuada para poder hacer frente a las fianzas necesarias para emprender la actividad. Son en su mayoría trabajos aislados realizados por un número muy limitado de personas, lo habitual es de uno a diez mineros, con escasos conocimientos técnicos y medios rudimentarios. Trataremos pues en una primera parte de evaluar el ciclo de vida de las operaciones mineras a gran escala y en una segunda se realizará la del ciclo de vida de la minería a pequeñas escala y artesanal.

### 3.2 Ciclo de Vida en la Minería Mediana y a Gran Escala.

El ciclo de vida de una operación minera de mediana y gran escala se caracteriza por ser largo y en él podemos diferenciar claramente cinco etapas (Figura 3.4): exploración, evaluación, explotación, clausura y reutilización en el caso que otra actividad sea viable.



*Figura 3.4 Fases del Ciclo de Vida de una Mina*

Existen dos aspectos netamente diferenciadores entre los proyectos mineros y cualquier otro proyecto industrial. En primer lugar la ubicación de la mina se haya determinada de antemano por la localización del recurso mineral a explotar. Tiene pues una única ubicación posible, la impuesta por la localización metalogénica del yacimiento. La segunda característica es que el comienzo de la operación minera esta precedido de un largo periodo de exploración, prospección y evaluación de tipo económico (5 a 15 años), pero también ambiental, dado que desde un primer momento la compañía debe recabar el máximo posible de datos ambientales del entorno regional de la mina, con los que posteriormente realizar la evaluación del impacto ambiental y su seguimiento.

### **3.3 Fase de Exploración y Evaluación Económica**

La fase de exploración y evaluación económica del yacimiento, desde el punto de vista ambiental, es decisiva para una correcta gestión de los posibles impactos al medio que se puedan producir durante las fases posteriores.

Esta fase presenta más riesgo desde el punto de vista económico, dado que es la que decidirá si el área explorada es un yacimiento de rendimiento económico, y por lo tanto explotable. Sin embargo, es la más importante desde el punto de vista ambiental, dado que una metodología adecuada en la toma de datos permitirá la realización de una línea de base ambiental de calidad.

Los elementos importantes a tener en cuenta durante esta fase están recogidos en la Tabla 3 1. Aparte de estos principios, varias fuentes (“Best Practice Environmental Management in Mining”, Environment Australia, 2002, y la “Guía Ambiental para Actividades de Exploración de Yacimientos Minerales en el Perú”, DGAAM, 1995) recomiendan las siguientes pautas:

- Mantener buenas relaciones públicas. El personal de la compañía minera debe mantener informado a los propietarios de tierras sobre la naturaleza y la ubicación de los trabajos de exploración, e invitarlos a inspeccionar, por ejemplo, los equipos de perforación y los caminos de acceso. Es recomendable (y obligatorio en países como el Perú) llegar a un acuerdo con las comunidades directamente afectadas por una nueva operación minera (Licencia Social) antes de empezar con la Fase de Pre-Factibilidad de cualquier proyecto minero.
- Deberá hacerse todo lo posible para minimizar las perturbaciones ambientales durante la construcción de caminos de acceso, campamentos mineros y puntos de perforación.
- Se debe evaluar la erosión potencial de las carreteras de acceso y la aplicación eficaz de medidas de control de erosión durante su construcción, especialmente en los cruces con los arroyos. Por ello se considera conveniente limitar el uso de vehículos y la formación de huellas y rehabilitar para evitar la erosión. Recomiendan el uso de máquinas desarmables o el uso de burros para el transporte, que en ciertas regiones de Sudamérica esta muy extendido (ejemplo Proyecto Minero Río Blanco, Ecuador).
- Se deben también definir los procedimientos adecuados para la gestión de los fluidos de perforación y productos derivados del petróleo usados durante la campaña.

**Tabla 3.1 Buenas prácticas durante la Fase de Exploración y Evaluación Económica**

Fase	Elementos importantes a tener en cuenta
Exploración y evaluación económica	<p>Control de la erosión de las carreteras temporales construidas</p> <p>Gestión de los fluidos de perforación</p> <p>Gestión de desechos producidos</p> <p>Recogida de muestras para análisis geoquímicos del medio ambiente</p> <p>Comenzará la recopilación de datos sobre el estado inicial del área:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrológicos e hidrogeológicos</li> <li>• Climáticos</li> <li>• Biológicas</li> <li>• Geoquímicos</li> </ul> <p>Determinar las necesidades de agua para la operación minera</p> <p>Calcular el balance hídrico de la mina y de la cuenca o subcuenca donde se ubica</p> <p>Realizar una auditoría sobre los potenciales contaminantes relacionados con las operaciones mineras</p> <p>cuantificar los posibles trayectos de transporte de contaminantes</p> <p>Elaborar estrategias para minimizar el riesgo de contaminación del agua</p> <p>Desarrollar un sistema de drenaje preliminar de la escorrentía para la gestión de avenidas</p> <p>Desarrollar procedimientos de contingencia de avenidas</p>

### 3.3.1 Línea Base Ambiental

En la fase de exploración debe empezar la recolección de datos de línea base, es decir un registro de las condiciones ambientales existentes sin el proyecto propuesto, que continuará hasta la fase de post-cierre. Estos datos son indispensables para conocer el estado ambiental inicial del área de la operación y su entorno, y se presentarán en el EIA. Como se mencionó en la Sección 2, la línea base sirve para evaluar las variaciones que ocurren durante la vida del proyecto, sean éstas vinculadas a la gestión ambiental del proyecto o a eventos exteriores. Por otro lado, los datos se pueden aprovechar para entender mejor las características del yacimiento, lo que ayudará en la planificación de la explotación. Para la toma de datos es importante conocer las áreas donde impacta la actividad minera. En la siguiente Tabla 3.2 se presentan los datos necesarios para una línea base ambiental. Llamamos la atención algunos de los datos a recabar, como son los epidemiológicos, o los culturales, pero el hombre forma parte del medio ambiente, y por lo tanto es necesario obtener datos para evaluar el posible impacto que la actividad minera podría generar en los habitantes de la región.

**Tabla 3.2 Información Necesaria para una Línea Base Ambiental**

Fase	Datos a recoger para la línea de base ambiental
Exploración y evaluación económica	<p>Hidrológicos e Hidrogeológicos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Cursos de agua permanentes y estacionarios</li><li>• Niveles acuíferos</li></ul> <p>Geoquímicos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Calidad de las aguas superficiales y subterráneas, con especial atención al contenido en metales pesados</li></ul> <p>Bióticos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Datos cuantitativos y cualitativos sobre la fauna y la flora del área</li><li>• Especies endémicas</li><li>• Líneas migratorias.</li></ul> <p>Epidemiológicos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Afecciones frecuentes del área</li><li>• Principales causas de mortalidad</li></ul> <p>Socioeconómicos y Culturales:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Usos tradicionales de la tierra</li><li>• Usos tradicionales de agua</li><li>• Manifestaciones culturales indígenas.</li><li>• Sectores de actividad</li></ul>

### 3.3.2 Estudio de Impacto Ambiental y Estudio Hidrogeológico

Durante el proceso de evaluación de impacto ambiental se evalúa cada actividad de la operación minera y su potencial de tener algún efecto sobre cada componente del medio ambiente, medio humano y medio económico. Se puede evaluar cada impacto negativo (o positivo) en grados de impacto: extremo, alto, moderado, bajo, mínimo y nulo. Con esta evaluación se puede diseñar la operación y las actividades para minimizar o eliminar los impactos negativos. La legislación de cada país define los procedimientos para la elaboración y presentación del EIA y los componentes que debe contener (ver también sección 2.5).

Para evaluar el impacto ambiental de un proyecto sobre la calidad del agua es importante no solo considerar la concentración de contaminantes (expresada por ejemplo en mg/L), sino también la carga (expresada por ejemplo en kg/día). La carga  $m$  se calcula multiplicando la concentración  $c$  con el caudal  $Q$ :

$$m = c \cdot Q$$

La carga cuantifica por ejemplo la masa total de un contaminante que se emite a un ecosistema.

Por otra parte, en esta fase se deberá realizar el estudio hidrogeológico regional para evaluar el impacto que sufrirá el medio hídrico. En función de los datos obtenidos y una vez analizados convenientemente, se definirán las mejores tecnologías para una protección adecuada del recurso más valioso en zonas áridas y semiáridas, el agua. Es necesario no sólo realizar un buen estudio, sino que éste sea claro, conciso y transparente.

Muchas investigaciones han demostrado que el componente hidrogeológico en los EIAs es habitualmente demasiado débil, p. ej. Kuma et al. (2002) y los estudios de casos controvertidos de la minería en el Perú, realizado por el equipo de ERMISA (2006). Frecuentemente falta una apreciación adecuada de los impactos a largo plazo, y la investigación hidrogeológica solo abarca el entorno inmediato de la mina, sin establecer el balance de agua de la cuenca.

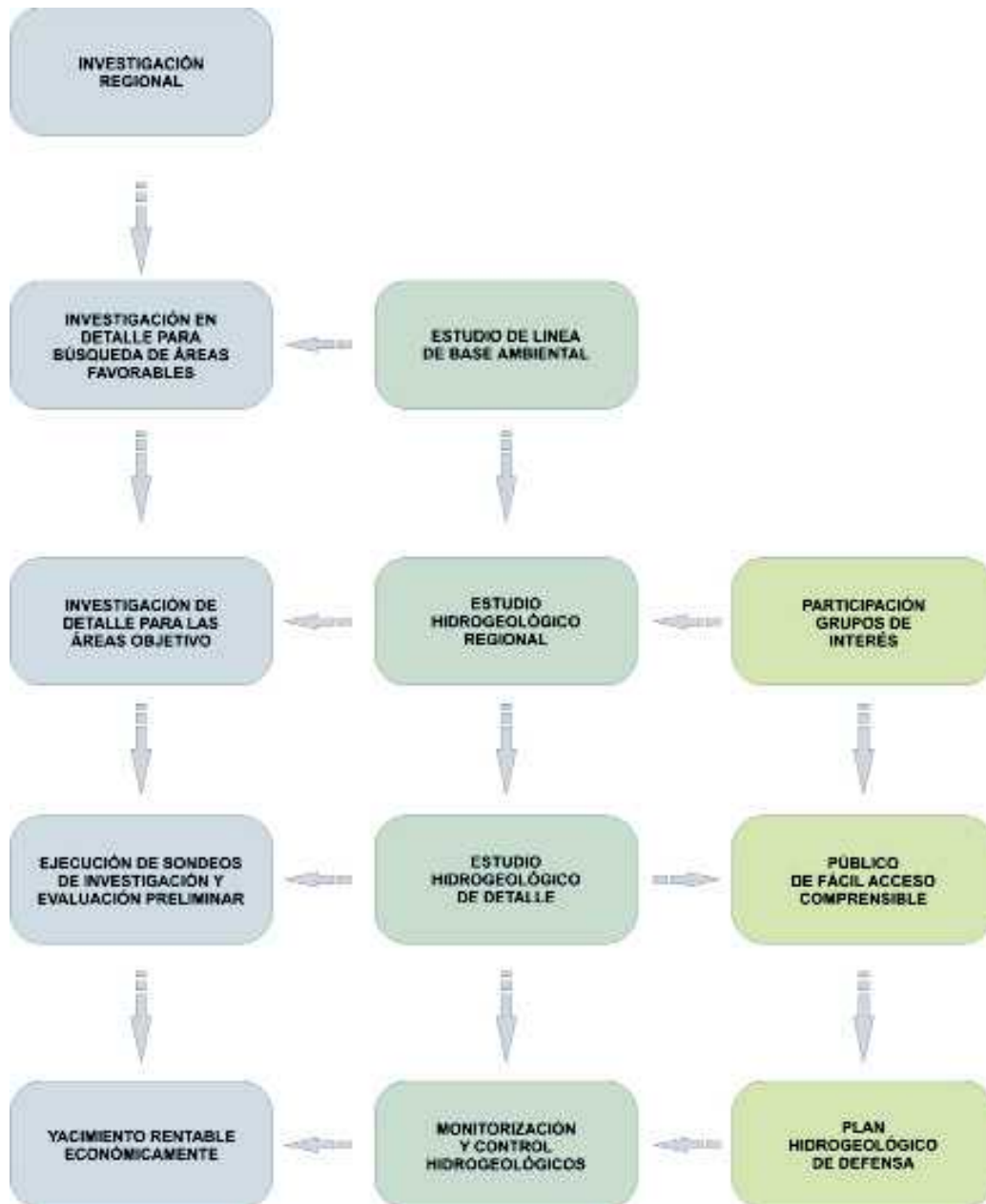
Para crear transparencia y aceptación para el proyecto minero propuesto, los estudios hidrogeológicos deben ser públicos, y disponibles antes del proceso de consulta.

### 3.3.3 Plan Hidrogeológico de Defensa

Durante esta fase de investigación del proyecto, y en base a los datos hidrogeológicos recogidos, se deberá realizar el plan hidrogeológico de defensa. En este documento se recogerán las actuaciones que llevará a cabo la empresa para la protección de las aguas subterráneas, su monitorización y control. La filosofía del documento debe ser la protección del recurso más allá de la fase de explotación, dado que el impacto sobre el medio hídrico que se pudiera producir perdurará durante un periodo superior a la vida de la operación minera.

En este documento se fijarán las medidas de vigilancia y monitorización de los niveles acuíferos, así como de las aguas superficiales, dado que existe una íntima interrelación entre ambos (Loredo et al., 2008). Es importante conocer las direcciones preferentes del flujo de las aguas subterráneas en los acuíferos, para poder delimitar las zonas de control más interesantes para la ubicación de los

piezómetros y sondeos de control. En el caso de las aguas superficiales los puntos de control son más fáciles de delimitar dado que se conoce de antemano los cauces de los ríos. Se debe prestar especial atención a los cauces estacionales, que se producen durante la época de lluvias, especialmente durante los acontecimientos climáticos extremos, como es el caso del fenómeno de El Niño y de La Niña. Durante estos eventos las variaciones de temperatura del agua superficial del centro sur del Océano Pacífico producen lluvias o sequías más pronunciadas. Deberán tenerse en cuenta estos acontecimientos para tener preparadas medidas de contingencia para prevenir daños en las instalaciones de la mina, especialmente en lo concerniente a los depósitos de estériles y colas del proceso de concentración.



*Figura 3.5 Ciclo de Exploración y Evaluación Económica*

Será además conveniente incluir en este documento un plan de monitorización de puntos de agua de abastecimiento a la población para tener una vigilancia sobre ella, y prevenir desde una etapa temprana la posibilidad de contaminación de estos puntos.

También se deben prever los impactos que sobre el medio hídrico que la operación podría ocasionar, tanto sobre los flujos de agua superficial y subterránea, como sobre la calidad de las aguas. En la sección 3.4 se explican los distintos tipos de impactos que pueden ocurrir. Una planificación cuidadosa de la operación y un buen plan hidrogeológico de defensa pueden reducir considerablemente estos impactos, lo que reduce los costes de operación y de restauración.

### 3.3.4 Fuentes de Agua

En las zonas áridas y semiáridas, aparte de las características del yacimiento, es muy importante asegurar el suministro de agua para la operación. El balance de agua de la cuenca (ver sección 2.4.3) revela si hay disponibilidad de agua suficiente para la demanda adicional que genera la operación prevista.

En la Tabla 3.3 se indican las posibles fuentes de agua para operaciones mineras, con énfasis en la situación actual de los países incluidos en el proyecto CAMINAR. Respecto al balance de agua de la operación minera se dan indicaciones más detalladas en la sección 3.4.4.

Si no hay suficiente agua disponible, el uso de fuentes alternativas como agua desalada puede ser una opción rentable. En otros casos, la construcción de nuevos embalses puede aumentar el volumen almacenado y la disponibilidad de agua en la cuenca, para el beneficio de la mina y posiblemente también otros usuarios. Por ejemplo, en Arequipa, Perú, la empresa minera Cerro Verde financió junto con una empresa hidroeléctrica la construcción de la Presa Pillones, que proporciona 3 m<sup>3</sup>/s adicionales a la cuenca. La empresa minera se ha reservado una licencia de solo 1 m<sup>3</sup>/s, quedando el caudal restante disponible para otros usuarios.

**Tabla 3.3 Fuentes de Agua**

FUENTE	CARACTERISTICAS
Fuentes cercanas	Cuerpos o afloramientos de agua en la superficie o subterráneas. Hay que aplicar investigaciones y análisis hidrológicos e hidroquímicos para confirmar la sostenibilidad de la fuente y la calidad del agua, investigaciones socio-económicas con respecto a los potenciales impactos, y evaluar los riesgos asociados. Sujeto al otorgamiento o compra de los derechos de agua correspondientes.
Lagos y ríos locales	Sujetos a cambios estacionales en sus niveles y caudales. Reciben sus aportes de la escorrentía y de acuíferos que afloran dentro de su área, en el caso de lagos o a lo largo del curso del río. Son sensibles a cambios de calidad. Los ríos son transportadores de agua (y contaminación) hacia usuarios aguas abajo. Pueden tener ecosistemas sensibles dependientes del agua en sus riberas.

FUENTE	CARACTERISTICAS
Construcción de Embalses	Los embalses pueden almacenar el agua que fluye en un río en periodos de caudales altos (lluvias, deshielo) y liberarla en periodos de caudales bajos. De esta forma se logra un flujo mas uniforme en el río a lo largo del año, y se puede aumentar la disponibilidad efectiva de agua en la cuenca. Sin embargo, hay que considerar también los impactos negativos de la construcción de embalses (inundación de ecosistemas terrestres y posiblemente de poblaciones y patrimonio cultural, interrupción de la dinámica sedimentaria del río, impedimento de la migración de peces, etc.)
Manantiales	Afloramientos de agua subterránea. Su confiabilidad depende del acuífero. Pueden tener ecosistemas dependientes del agua.
Escorrentía	La escorrentía es el flujo temporal sobre la superficie, que resulta de la precipitación, y que alimenta los ríos, lagos y que se infiltra hacia los acuíferos de agua subterránea. Por su naturaleza temporal normalmente no representa una fuente de suministro pero puede representar riesgos por la inundación o acumulación temporal de agua.
Salares	En el altiplano de Bolivia y en algunas zonas desérticas de Chile y Perú existen salares – producto de cuencas endorreicas y la alta evaporación que produce lagunas de agua salobre o salada – a veces con depósitos de sales y minerales no metálicos (litio, boro etc.). Soportan ecosistemas específicamente adaptados y a veces son Áreas Protegidas, debidos a su biodiversidad especial. Por debajo las lagunas frecuentemente existen depósitos de agua pero su uso es sujeto a extensos estudios para confirmar que la abstracción de agua no excede la recarga y no genera cambios químicos que podrían afectar a los ecosistemas.
Agua subterránea	Normalmente se trata de acuíferos profundos con recarga de fuentes de precipitación lejanas. Los acuíferos poco profundos pocas veces tienen un coeficiente de almacenaje suficiente o son fuentes de agua doméstica para las poblaciones aisladas. Se requieren estudios detallados para determinar sus características, tasa de recarga, y los posibles impactos asociados con el uso del agua.
Fuentes lejanas	En zonas áridas y semiáridas es frecuente el hecho de que no existan derechos de agua disponibles o simplemente no hay agua disponible en las cantidades requeridas. En estos casos hay que buscar el agua en otras fuentes más lejanas.



FUENTE	CARACTERISTICAS
Cuencas aledañas	En la zona de cordillera Sudamérica por la diferencia de aspecto o altura, las cuencas aledañas pueden tener características muy diferentes en términos de clima y precipitación. Pueden existir posibilidades de transferencia de agua por tubería, canal o túnel de una cuenca a otra, sujetas siempre a la política de Estado y la disponibilidad del recurso.
Agua del mar	En áreas áridas o semiáridas con acceso al mar el uso de agua del mar en proyectos mineros se pone cada vez más como opción viable, dada la falta de agua fresca, la no disponibilidad de derechos de agua o restricciones sobre su uso por razones ambientales. Se puede adaptar el proceso del mineral, la molienda y flotación, al uso de agua salada dejando un requerimiento mínimo para el agua dulce obtenido por sistemas de desalinización por osmosis inversa. El uso de agua del mar reduce considerablemente los riesgos estratégicos y algunos de los riesgos operacionales.

### 3.3.5 Plan de Actuación Sociocultural

Otro documento importante es el plan de actuación sociocultural, en el que la empresa refleje las diversas actuaciones que pudiera llevar a cabo en el ámbito social y cultural de la comunidad. Muchas empresas del sector, como es el caso de Cobre las Cruces, en la Faja Pirítica (España), o de Minera o Fundación Pelambres en Chile, invierten en el activo intangible con la esperanza de que les genere un beneficio tangible, como pueda ser la aceptación social del proyecto por parte de la comunidad, mejorar el nivel sociocultural con mejoras en los centros educativos de la región u otras actividades de tipo cultural. El Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerimiento fundamental para proyectos mineros medianos y mayores, incluye una Línea Base Social con información a nivel de perfil respecto a las comunidades y las condiciones socioeconómicas en el área de influencia del proyecto. También debe incluir una descripción de las medidas que va a tomar la empresa minera para mitigar o compensar los impactos sobre la vida y el bienestar de los habitantes afectados por el proyecto. Como se ha mencionado anteriormente, es buena práctica (y en el Perú es necesario) tener un acuerdo entre las comunidades y la empresa minera respecto a la mitigación o compensación, conocido como la Licencia Social.

Para grandes proyectos mineros que necesiten de financiación internacional, los bancos normalmente exigen cumplimiento con las pautas indicadas en la Guía Medio Ambiente, Salud y Seguridad del IFC / Banco Mundial (World Bank Group Environmental, Health, and Safety Guidelines<sup>1</sup>).

En general la implementación de proyectos mineros, según sea la naturaleza de los mismos (Grandes, Medianos o Pequeños), genera efectos sobre los diversos procesos a ser considerados en el tratamiento del componente social previo al inicio del Proyecto.

<sup>1</sup> <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

En el caso de grandes emprendimientos, el Estudio de Impacto Ambiental deberá identificar en el capítulo correspondiente al tratamiento de los factores sociales las variables críticas que pueden comportarse como generadoras de conflictos futuros. Ejemplos de esta naturaleza están asociados al uso de recursos locales como el agua o afectaciones en el ámbito espacial. Según las técnicas de laboreo de la mina, éstas pueden ser a cielo abierto, lo que implica extensiones considerables de terrenos que pertenecen a privados o comunidades, o pueden ser emprendimientos más pequeños o de minería de interior más localizados.

En este sentido se hace necesario identificar qué extensiones de terrenos serán afectadas y en qué forma, si habrá alteraciones de la fisiografía, afectaciones a fuentes de agua, afectaciones a pastizales extensivos, abrevaderos para los animales o terrenos de producción agrícola y otros.

Este proceso requiere por lo tanto la negociación de intereses de las partes involucradas, empresas y propietarios. En general, debido a que el yacimiento está localizado en las estructuras geológicas, no es posible que exista alternativa de cambio, por lo que el ámbito espacial será fijo y sujeto a la concertación para mitigar efectos en los grupos sociales a ser involucrados.

Se dan casos en que la propia estructura del tajo está dispuesta en el propio poblado asentado con muchos años de antigüedad. En esos casos se hace necesario el traslado de viviendas o construcción de un poblado en otros ámbitos geográficos, lo cual no es fácil ya que a veces se presenta dificultad para el abastecimiento de agua en forma pasiva. Otras veces al interior del propio poblado se identifican estructuras de patrimonio cultural o artístico, situaciones que no son fáciles de resolver.

En la práctica muchas empresas asumen con prepotencia las acciones para el desarrollo de la mina; esto es consecuencia de que la normativa en los diferentes países no es lo suficientemente clara para el tratamiento legal del suelo y del subsuelo, o del patrimonio cultural y ecológico.

La forma de evitar potenciales conflictos socio – ambientales es generar un adecuado proceso de concertación de intereses, lo cual exige a los empresarios identificar las limitaciones posibles de encontrar, ya que los habitantes locales no poseen ni personal profesionalizado ni medios económicos para contratarlo para evaluar las posibles afectaciones. Por ello, los planteamientos que se generen en los procesos de concertación tienen que ser objetivos y libres de posibles malas interpretaciones a futuro.

### **3.4 Fase de Explotación (Construcción y Operación)**

Una vez que se ha llegado a la evaluación técnico-económica del yacimiento, y con posterioridad a la aprobación de la operación minera y las medidas para evitar o mitigar los impactos ambientales y sociales por parte de la autoridad competente del país, comienza la fase de explotación del yacimiento, que se divide en las tareas de construcción y explotación.

#### **3.4.1 Construcción**

Esta es una de las fases decisivas en lo que a impactos mineros se refiere, pues es al comienzo de esta fase, en el momento de la construcción de toda la infraestructura minera, pistas, planta de procesamiento de mineral, oficinas, talleres, etc., cuando comienza a percibirse el impacto de

la instalación. Muchos de los impactos producidos perduran en el tiempo y por ello aparecen en subsiguientes fases del ciclo de vida. Los impactos pueden variar desde los impactos físicos que cambian el paisaje (huecos, caminos, etc.) hasta cambios al microclima que afectan a la flora y consecuentemente a la fauna (corte de vegetación, desvíos de cursos de agua etc.)



**Figura 3.6 Operaciones de Construcción de la Conducción de Suministro de Agua a una Mina**

Uno de los impactos más importantes de las operaciones mineras en regiones áridas y semiáridas es su impacto sobre el medio hídrico, y por ende tendrá un tratamiento más exhaustivo. Si bien todos los posibles impactos al medioambiente son importantes cualitativamente, existe un orden de prelación en el cual los recursos hídricos son prioritarios cuantitativamente para estas aéreas. El agua, por ejemplo, tiene la capacidad de transportar contaminantes sobre largas distancias y así extender el área de influencia del proyecto. También puede haber conflictos potenciales sobre su uso o cambios a su calidad debido a las actividades mineras.

El deseo de minimizar los impactos que las actividades mineras pueden producir en el medio ambiente y, en particular, sobre el agua, está definido en general por la aplicación de las “buenas prácticas”. Existen numerosas guías respecto a las buenas prácticas tales como aquellas encontradas en el sitio web [www.goodpracticemining.org](http://www.goodpracticemining.org) y el programa “Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry”<sup>2</sup> del gobierno Australiano, que incluye versiones en español de algunas de sus guías.

A lo largo de este documento se analizan brevemente fundamentos teóricos y opciones prácticas para la correcta gestión del agua en las regiones donde la escasez del recurso es patente. Se trata de

<sup>2</sup> [http://www.ret.gov.au/resources/mining/leading\\_practice\\_sustainable\\_development\\_program\\_for\\_the\\_mining\\_industry/Pages/Stewardship.aspx](http://www.ret.gov.au/resources/mining/leading_practice_sustainable_development_program_for_the_mining_industry/Pages/Stewardship.aspx)

controlar y minimizar los impactos que pudieran generarse, lo que se define como “La Mina Invisible” (Herman, 2006). La gestión del agua en regiones áridas y semiáridas requiere la eliminación de posibles vertidos contaminados, la minimización de la demanda, maximizando la reutilización y el reciclado del agua para su uso en las operaciones de la mina. Todas estas medidas suponen un coste económico y por ello deben contar con la inversión adecuada, pero generan un beneficio intangible de cara al público y los reguladores, cumpliendo las normas y no produciendo variaciones en la cantidad o calidad del recurso agua.

Durante la fase de explotación es muy importante la fiabilidad de los datos del proceso de exploración e investigación, y no sólo desde el punto de vista económico, sino también desde el ambiental. Durante el periodo de vida de la operación minera no sólo se procederá a validar los datos ya recogidos, sino que también será necesario recoger nuevos datos para medir y cuantificar cualquier tipo de impacto, y también para poder implementar las mejores opciones durante el proceso de clausura de la mina. Algunos elementos importantes a tener en cuenta durante esta fase están recogidos en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Elementos por considerar - Fase de Explotación**

Elementos importantes a tener en cuenta	Comentarios
Validar las predicciones de diseño y recoger más datos para reducir las incertidumbres de diseño	La importancia de datos completos y confiables no se puede sobre enfatizar. La empresa que no tiene los datos para soportar su desempeño ambiental corre el riesgo de acciones legales y consecuencias económicas mayores.
Vigilar el medio ambiente	Recopilación de datos y tener planes de emergencia para mitigar el impacto de accidentes
Minimizar el riesgo de impactos ambientales y mantener la flexibilidad de la operación	Mantener personal capacitada, y con experiencia y la autoridad de tomar acciones preventivas
Identificar y gestionar los riesgos	Actualizar la evaluación de riesgos en forma periódica de acuerdo con los cambios productivos y poner en práctica las técnicas de rehabilitación progresiva durante la fase de operación.
Desarrollar y aplicar técnicas para la rehabilitación progresiva	
Desarrollar una recopilación de datos para el programa de rehabilitación del área	Mantener la monitorización y vigilancia durante el período post-cierre hasta que se produzca la cesión de los terrenos a la administración o la comunidad.

Los impactos más significativos durante las diferentes fases que componen el proceso de explotación son muy variados y tienen incidencia no solo en los recursos hídricos, sino también en la atmósfera y en los suelos (Tabla 3.5).

**Tabla 3.5 Potenciales Impactos - Fase de Explotación**

FASE DE LA OPERACIÓN	PROBLEMÁTICA	IMPACTO AMBIENTAL
Construcción	Apertura del hueco minero	Paisaje
	Remoción del suelo vegetal	Biota
	Alteración del ciclo hídrico	Curso de agua y acuíferos
	Polvo/Gases de voladura	Atmósfera
	Ruido/Vibraciones	Poblaciones
Explotación	Depósitos de residuos	Paisaje, suelos y aguas
	Profundización del hueco	Acuíferos
	Polvo/gases voladuras	Atmósfera
	Ruido/Vibraciones	Poblaciones
	Contaminación del agua	Cursos fluviales y acuíferos

Como se ha descrito en la Sección 2 de este documento, durante el proceso de desarrollo de una mina es necesario, especialmente en las regiones áridas y semiáridas, asegurar un suministro seguro y constante de agua para todas las operaciones necesarias para la obtención del mineral refinado. Para poder asegurar este suministro es necesario realizar una serie de captaciones de agua que pueden ser:

- Cauces superficiales fluviales: mediante tomas en los ríos, previa autorización administrativa;
- Desviación de caudales: captaciones en presas destinadas a otros usos o bien provenientes de transvases entre cuencas;
- Campos de pozos para extraer agua de los acuíferos;
- Aportes de fuentes alternativas: se trata de sistemas de transporte a través de conductos de agua desalada para el abastecimiento de las operaciones.

Estas captaciones de agua generan unos impactos debido a los sistemas de bombeo y transporte de agua, suministro de energía eléctrica, etc. En algunos casos las conducciones de agua necesarias

para el abastecimiento generan restricciones para la migración de animales silvestres (por ejemplo: guanaco). Las pistas para la instalación de los conductos, su vigilancia y mantenimiento, pueden ser además fuentes generadoras de erosión.

### **3.4.1.1 Impactos sobre las Aguas Superficiales**

Las diversas operaciones mineras a realizar pueden ocasionar una serie de alteraciones en los flujos de agua superficiales. Los impactos de la minería y post-minería sobre la hidrología superficial pueden ser sustancialmente importantes si no se aplican tecnologías adecuadas. Podemos decir que esta modificación puede ser severa en el caso de la construcción de las escombreras y balsas de lodos y más moderada en el caso de la construcción de los viales y las infraestructuras.

Los aspectos más importantes son:

- Interrupción y desvíos de cursos fluviales
- Tomas de agua abandonadas
- Erosión y arrastre de material
- Inundaciones

Deben estudiarse configuraciones alternativas a las modificaciones superficiales para minimizar el potencial de los efectos hidrológicos, y aplicar medidas de mitigación (Spotts y Burrell 1997), teniendo en cuenta que los efectos pueden extenderse fuera del área estricta de las operaciones mineras, tanto en el espacio como en el tiempo. También hay que tener en cuenta que las actividades pueden suponer tanto un incremento como una disminución de caudales de escorrentía. La falta de un diseño hidráulico – geotécnico adecuado puede producir desastres tales como aluviones de lodos y suelos que resultan de lluvias torrenciales sobre áreas de minas con depósitos inestables de estériles o lodos.

Un aspecto esencial a tener en cuenta es la interrelación entre aguas superficiales y subterráneas, al igual que las condiciones referentes a meteorología, topografía, edafología, cobertura vegetal y geología.

Las escombreras de estériles, las excavaciones endorreicas y las depresiones por subsidencia y/o colapso implican una disminución de la escorrentía superficial. Además puede modificarse el hidrográfico, aguas abajo, en relación con caudales punta y caudal de base, todo ello junto a modificaciones en las condiciones de erosión, arrastre y sedimentación fluvial.

Las operaciones mineras pueden llegar también a provocar variaciones en las tasas de evaporación, especialmente cuando se comienzan a generar áreas inundadas o balsas de lodos. También se producen modificaciones en la evapotranspiración en las áreas revegetadas y en los propios humedales creados para el tratamiento de las aguas procedentes de los bombeos de la mina, de existir la necesidad de crear estos elementos durante la fase de explotación.

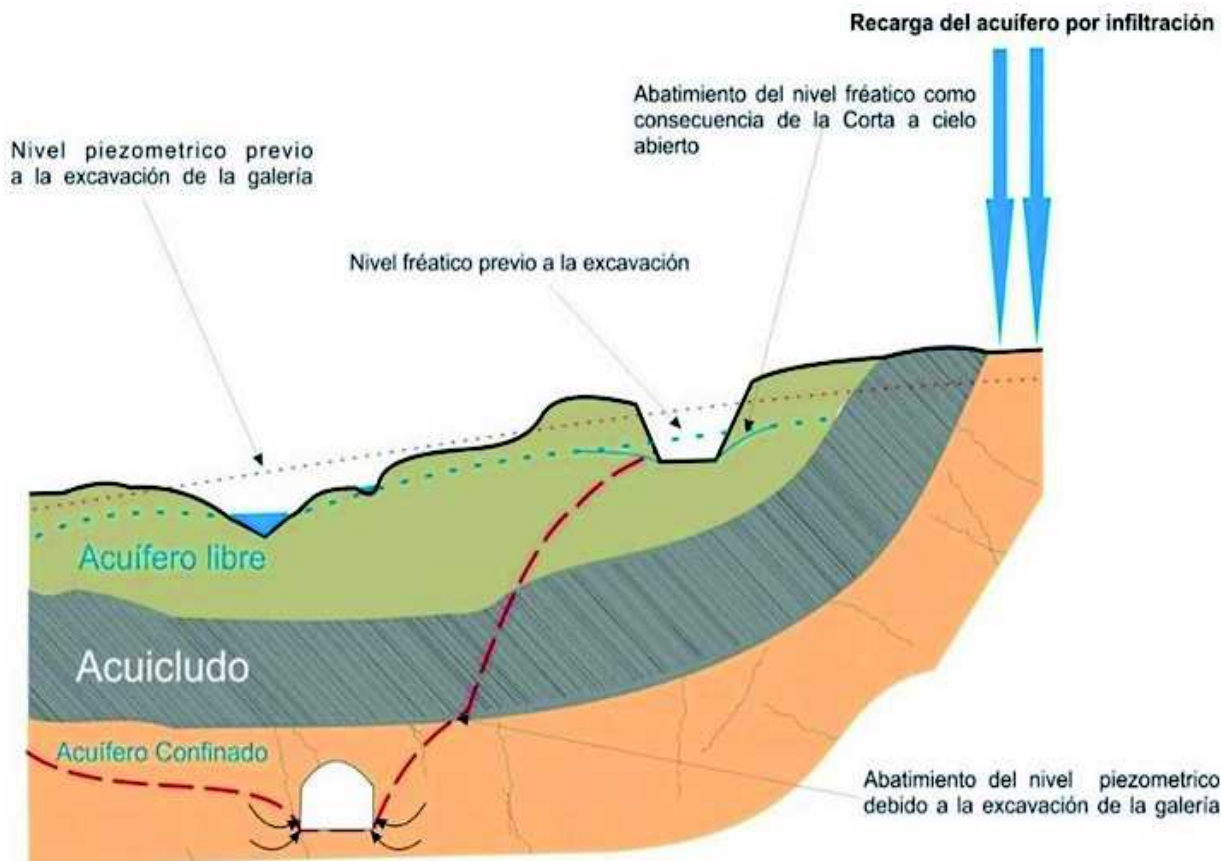
Otro impacto que podría producirse es la aparición de flujos continuos de agua en cursos normalmente intermitente que suele producir cambios a la vegetación y ecosistemas ribereños. Actualmente en regiones áridas de Australia se evita realizar vertidos de las aguas procedentes de los bombeos dado que los cauces en los cuales se vierten ven incrementados sus caudales de un modo radical y esto genera el crecimiento de una vegetación ribereña en las orillas del río, que se verá seriamente

afectada en el momento en que estos aportes excedentarios de la operación minera desaparezcan.

### 3.4.1.2 Impactos sobre las Aguas Subterráneas

La explotación de las riquezas minerales del subsuelo genera un impacto a las aguas, especialmente a las subterráneas. Esta alteración depende de la configuración geológica del yacimiento, existiendo un riesgo más alto en los yacimientos con una roca caja de características permeables, o formaciones con una estratigrafía marcadamente horizontal o con pequeños buzamientos.

La alteración del régimen de caudales subterráneos puede ser motivada por la generación de espacios mineros, si éstos se encuentran por debajo del nivel freático (Figura 3.7), o bien por bombeos de los acuíferos para secar las labores mineras o para obtener agua para las diversas operaciones de la instalación. Es importante realizar estudios hidrogeológicos y preparar modelos computacionales (p.ej. MODFLOW; Harbaugh, 2005) para pronosticar los posibles impactos sobre el régimen hidrogeológico.



*Figura 3.7 Modificación de los niveles freáticos y piezométricos debidos a la actividad minera*

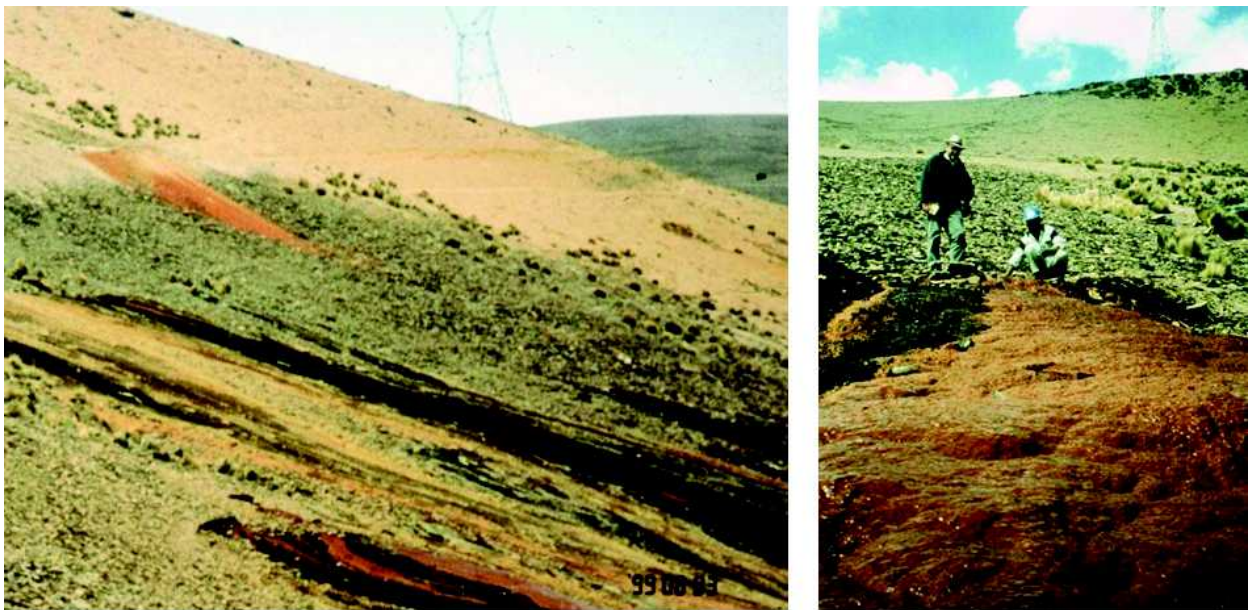
Esta modificación de los flujos naturales de drenaje afectará a largo o medio plazo a diferentes aspectos del balance hidrológico (ver sección 2.2.4).

## Modificaciones en el Flujo Subterráneo

El desarrollo de una operación minera, con la apertura de huecos, puede alterar el flujo del agua subterránea o crear nuevos flujos. Es así que pueden desaparecer barreras hidrogeológicas naturales y producirse mezcla de aguas.

Cuando existe un acuífero confinado subyacente, la descompresión provocada por el hueco minero puede ocasionar aportes de aguas profundas, a través de fallas, pero también a favor de fracturas creadas por la presión de confinamiento. En otros casos el aporte de agua puede proceder de acuíferos laterales, a veces colgados respecto al fondo de la mina, con piezometría por encima del fondo de la explotación.

Al referirnos a estas interconexiones no debemos tener presente sólo el efecto de los huecos excavados en la operación minera; existen casos concretos en los que la malla de sondeos de investigación ha creado una interconexión permanente, imposible después de sellar. En un caso se trata de sondeos de investigación preliminares, que alcanzaron formaciones muy por debajo del yacimiento, por los que acceden a las labores mineras aguas sulfurosas con altos contenidos de cloruros y sodio, y elevada temperatura. Otro caso que podemos citar es en el que una densa malla de sondeos de investigación puso en comunicación a aguas subsuperficiales de calidad mediocre con el acuífero en el que se ubica la mineralización, recibiendo a través de ellos la descarga del acuífero superior. En minas de carbón a cielo abierto en Australia se han observado estos aportes de agua a presión desde acuíferos confinados subyacentes a favor de sondeos de investigación que fueron perforados desde superficie y que pasan a ser artesianos cuando la excavación rebaja la cota del terreno. En otro caso en Bolivia, sondeos de exploración en una ladera se abandonaron sin sellarlos, y siguen descargando aguas ácidas de mina a perpetuidad (Figura 3.8).



*Figura 3.8 Sondeos de Exploración Abandonados sin Sellar, descargando Aguas Ácidas de Mina (Fotos: P. L. Younger)*

En ninguno de estos casos se tuvo en cuenta esta circunstancia y, actualmente, ya es imposible realizar ningún trabajo de cementación o aislamiento, que permitiera interrumpir dichas conexiones.



Por un lado, la creación de manantiales y puntos de descarga artificiales afecta al balance hídrico del acuífero. Este impacto puede ser más significativo en las zonas áridas.

Por otro lado, los impactos de estas nuevas situaciones hidrogeológicas dependen de la calidad de las aguas cuyo flujo se ve alterado. Si las calidades de las aguas interconectadas son semejantes no se provocan problemas. Si el sondeo capta aguas contaminadas, puede provocar contaminación de otros acuíferos o aguas superficiales. Cuando se produce un acceso de aguas superficiales a acuíferos profundos, lo habitual es que éstas aguas contengan más oxígeno y que su composición no esté en equilibrio con el substrato rocoso, por lo que se pueden producir procesos de disolución o precipitación.

Para evitar estos efectos adversos, a la hora de retirar los equipos de perforación hay que realizar un entubado resistente a la corrosión, o sellar de forma duradera los distintos tramos del sondeo correspondientes a los distintos acuíferos. Si se realiza el entubado, estos sondeos se pueden aprovechar para la monitorización de los acuíferos, tanto respecto a niveles como a calidad de las aguas.

### **Modificaciones en el Sistema Hidrológico**

Las operaciones mineras subterráneas tienen el efecto de bajar el nivel freático por el drenaje hacia los túneles y otras excavaciones subterráneas y el bombeo del agua fuera de la mina para permitir la operación. A veces se instalan túneles de drenaje por debajo de la mina para facilitar el desagüe y para mantener las labores secas. El cono de depresión causado por estas estructuras drenantes rebajará los niveles freáticos en el entorno de la operación, lo que puede afectar a pozos vecinos de otros usuarios de agua.

A terminar la operación y cerrar la mina existen dos situaciones potencialmente peligrosas:

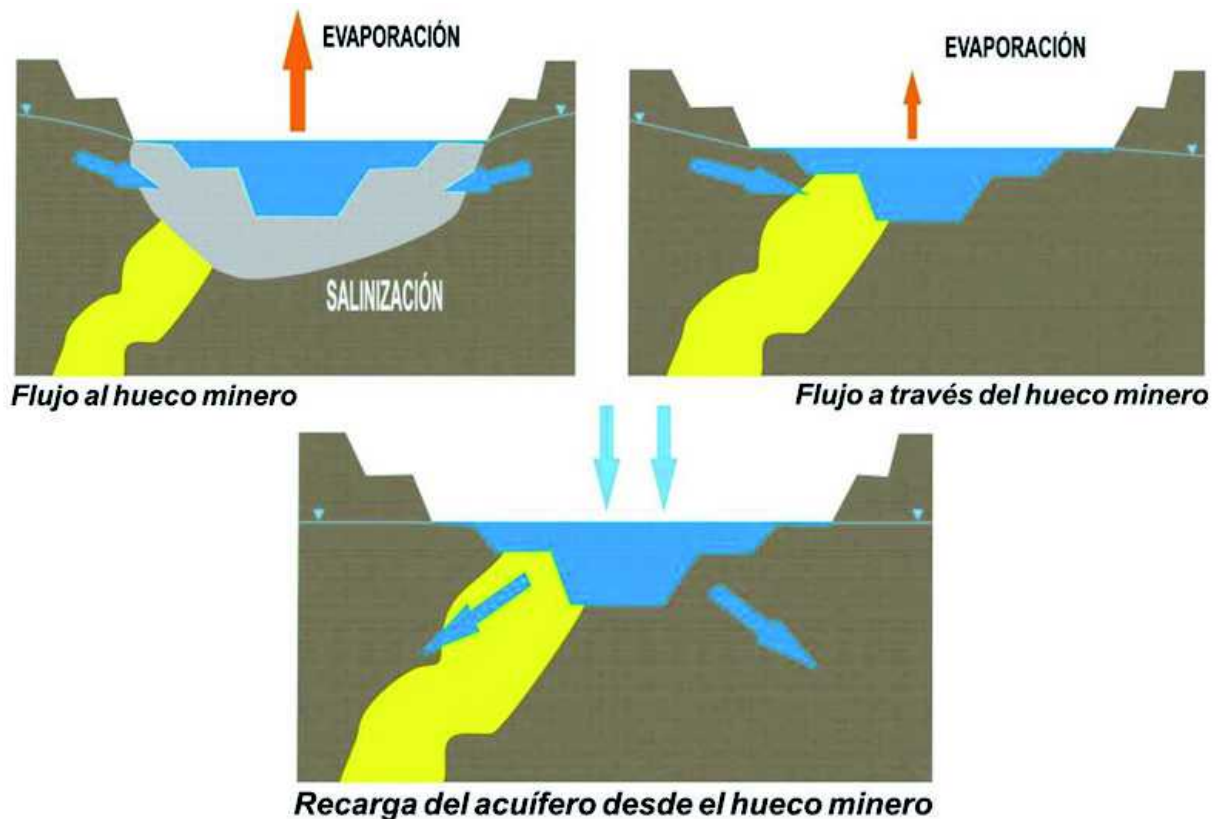
1. Si se dejan abiertos los túneles de drenaje y otras salidas, el flujo de agua continuará con el potencial de ser contaminada y/o ácida. Aparte, los niveles freáticos seguirán bajos en el entorno de la operación a perpetuidad.
2. Si se cierran los túneles y otras salidas, el nivel de agua en los labores subterráneas aumentará con el potencial de producir laderas y taludes inestables por el efecto debilitante de la presión del agua freática y/o con el riesgo de una falla abrupta de un tapón causando una crecida e inundación en sectores aguas debajo de la mina.

Es importante emplear a ingenieros hidráulicos e hidrogeólogos especialistas para analizar la situación y realizar un análisis de riesgos.

Un caso especial, y frecuente, de impacto al sistema hidrológico, se produce en la minería subterránea, cuando se trabaja con cualquier método que implique hundimientos de techo, o cuando éstos se provocan accidentalmente. En este caso cambia drásticamente la permeabilidad del techo, y se pueden producir afecciones a acuíferos suprayacentes o hasta a aguas superficiales.

En minería a cielo abierto se han estudiado diferentes explotaciones inundadas, y se han llegado a sintetizar tres situaciones tipo, especialmente con respecto a la salinidad del agua almacenada, y que son consecuencia de la recarga y descarga, relacionada con la piezometría y permeabilidad de los sistemas hidrogeológicos implicados (Figura 3.9). El primer caso corresponde a un lago “ga-

nador” en el que, una vez alcanzadas las condiciones de equilibrio hidrológico, éste es receptor de escorrentías superficiales y subterráneas y las pérdidas se producen sólo por evaporación; en este caso la salinidad se incrementará con el tiempo. El segundo caso es aquel en el que el lago final de la corta registra una situación de “transitoria”, de manera que recibe agua subterránea en un sector, mientras que en otro alimenta a las aguas subterráneas; en este caso el incremento de salinidad por evaporación será muy reducido. El tercer caso corresponde a un lago “perdedor”, de manera que los aportes de escorrentía superficial sirven para alimentar a los acuíferos subterráneos adyacentes; en este caso el incremento de salinidad no será sensible (Fernández Rubio, 1998).



**Figura 3.9** Tipología de Huecos Mineros Inundados. (Basado en Fernández, 1998; Younger et al., 2002)

Los parámetros hidrogeológicos a monitorizar en general corresponden a la profundidad del nivel del agua subterránea sin el efecto de bombeo de pozos (nivel estático) y/o con bombeo de pozos (nivel dinámico). El monitoreo permanente de esta información permite estimar las variaciones del almacenamiento subterráneo, las tendencias en los niveles, su relación con los fenómenos de recarga y eventualmente anticiparse a posibles problemas debido a la sobreexplotación de los acuíferos u ocurrencia de importantes periodos de sequía. Ante estos dos últimos escenarios, es posible que al interior de la cuenca de interés ocurra que tanto las vertientes o manantiales y/o pozos someros (norias, punteras) disminuyan su caudal o incluso se sequen. Para el caso de los pozos someros, esto puede ser consecuencia del aumento en el tamaño del cono de depresión producto de una sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo.

Consecuentemente, con este problema es posible que con el aumento en la explotación de tramos más profundos del acuífero surjan problemas de calidad química de las aguas. Esto puede ocurrir

cuando los bombeos extraen las aguas de tramos cada vez más profundos del acuífero, los que en ocasiones representan niveles sujetos a condiciones fisicoquímicas diferentes con la consecuente liberación de elementos contaminantes al estar sometidos a condiciones fisicoquímicas diferentes. De la misma forma y en sectores costeros, es posible que el aumento en la explotación de los acuíferos contribuya a inducir la entrada al acuífero de agua de mar (con altos contenidos de sales), afectando por ende muy seriamente la calidad de las aguas.

Ejemplos de lo anteriormente descrito ocurren actualmente en algunos valles del norte de Chile donde coexiste una amplia actividad agrícola, con actividades mineras. En ellos se observan ciclos de recarga y descarga de acuíferos en los que el tema de sobreexplotación de acuíferos cobra relevancia, especialmente al final de estos ciclos. Esto dado que los principales afectados son privados o pequeños agricultores que poseen pozos de poca profundidad (< 20 m), los que quedan sin agua a partir del momento en que estos descensos superan la profundidad de estas norias o pozos someros. El conflicto se agudiza cuando estos pozos se encuentran al interior de la zona de captación definida por el cono de bombeo de pozos profundos, cuyos propietarios pueden ser empresas mineras, de agua potable y/o alguna actividad industrial.

Por tanto, es indispensable mantener un monitoreo hidroquímico completo que considere normas referidas, al menos, al uso que se le da al agua en la cuenca. Dados los costos de los análisis químicos, se recomienda estudiar la hidroquímica de la cuenca de interés y, a partir de una adecuada caracterización hidroquímica, seleccionar parámetros relevantes y fáciles de medir para monitorizar la calidad del agua de forma rutinaria. Cada cierto tiempo, y dependiendo del grado de vulnerabilidad de los acuíferos, habrá que realizar el análisis completo de los parámetros estipulados en las posibles normas de relevancia para los usos de agua existentes en la cuenca.

### **Reacciones con las Formaciones Geológicas**

La actividad minera normalmente incrementa la superficie de roca fresca expuesta al contacto con el agua y el oxígeno. El empleo de explosivos, los colapsos, las “explosiones de roca” y la deformación de hastiales puede llevar, incluso, a transformar localmente acuitados en acuíferos.

En estas circunstancias se puede producir la interacción físico-química entre agua y roca en grandes superficies de contacto con el potencial de generar ácido y así aumentar las concentraciones de metales en el agua. Por su parte, en el caso de escombreras y balsas de lodos, la superficie de roca fresca expuesta a ese contacto puede alcanzar cifras muy grandes. Todas las reacciones que pueden tener lugar en estas nuevas condiciones van a perdurar por mucho tiempo, tras la clausura de la actividad minera.

Las reacciones a las que estamos haciendo referencia también tienen lugar cuando las aguas infiltradas, a través de fisuras y poros, en la franja de-saturada por el drenaje minero, se ponen en contacto con el aire en galerías y cámaras mineras.

Como consecuencia de estas reacciones, cuando en una explotación minera se analiza la calidad química de las aguas fluentes, es posible identificar los diferentes orígenes del agua en base a su concentración química. En relación con las modificaciones de calidad, p.ej. se ha constatado en aguas de mina la presencia de nitratos en relación con el empleo de explosivos de base nitrogenada.

### 3.4.2 Operación

El agua tiene una gran importancia debido a la diversidad de usos no sólo en la extracción de los minerales sino en especial durante el procesado del mineral en la planta concentradora. En la siguiente tabla se resumen los usos que tiene el agua en la minería.

**Tabla 3.6 Usos de Agua en Operaciones Mineras**

Explotación de la mina	Procesado del mineral
Supresión del polvo – transporte del mineral y perforación	Flotación
Lavado de equipos y vehículos	Transporte y Trituración
Personal – bebida / higiene	Lavado de equipos
	Transporte de lodos

En la Tabla 3.7 se muestran a modo de resumen los procesos que se desarrollan en la mina durante la fase de explotación, unidos a los posibles impactos que pueden producir y las medidas que se pueden implementar para mitigar dichos impactos.

**Tabla 3.7 Resumen de los Procesos Mineros**

Proceso	Consumo	Impactos Producidos	Mitigación de Impactos
Perforación	Combustible Agua	Generación de Polvo Gases de combustión Ruidos Vibraciones	Perforación con agua o espumas.
Voladura	Explosivos	Polvo Gases de Voladura Proyecciones Ruidos Vibraciones Estéril Sacos de Explosivos	Control y seguimiento de las voladuras. Gestión de residuos.

Proceso	Consumo	Impactos Producidos	Mitigación de Impactos
Transporte	Combustible Agua	Polvo Gases Ruidos Vertidos accidentales de hidrocarburos	Riego de las vías de transporte del mineral.  Precaución durante las operaciones de mantenimiento de los equipos de carga y transporte.
Trituración	Energía Agua	Polvo Ruido	Uso de tecnologías de mitigación del polvo.  Aislamiento acústico de los recintos de trituración.
Clasificación	Energía Agua	Polvo Ruido Aguas residuales	Clasificación en húmedo, o uso de captadores de polvo.  Aislamiento acústico del área de clasificación.  Programa de gestión de las aguas de proceso.
Molienda	Energía Agua	Ruido Aguas residuales	Aislamiento acústico del área de molienda.  Programa de gestión de las aguas de proceso.
Concentración (Flotación)	Energía Reactivos químicos	Lodos Aguas residuales	Depósito y gestión de lodos.  Programa de gestión de las aguas de proceso.  Política de descarga cero. Sistemas de reducción de la evaporación.

Proceso	Consumo	Impactos Producidos	Mitigación de Impactos
Metalurgia	Energía Reactivos químicos Agua	Escorias Aguas residuales Ruido Gases	Depósito y gestión de escorias.  Programa de gestión de las aguas de proceso.  Aislamiento acústico del área.  Captación de gases de efecto invernadero.  Procesos de desulfuración de gases.

### 3.4.3 Flujos de Material durante la Fase de Explotación

Es importante conocer los flujos de materiales (Residuos Sólidos y Residuos Líquidos) durante esta fase, para poder evaluar los métodos adecuados para su gestión, así como las cuestiones peculiares que pudieran darse con alguno de ellos, p.ej. durante los procesos de cianurización de mineral para obtención del oro.

Las prácticas en la gestión del agua en la minería a cielo abierto y en minería de interior son diferentes. Sin embargo, ambas requieren principios específicos, medidas del bombeo, control de la calidad del agua, etc. Comprender la importancia de estos temas y adecuar las prácticas de gestión puede reducir el consumo de agua, reducir las pérdidas y/o reciclar el agua. Durante esta fase se puede producir una contaminación de tipo físico-químico de los cursos de agua – generada por partículas sólidas en suspensión, elementos tóxicos disueltos provenientes del proceso de concentración, vertidos accidentales de hidrocarburos, etc. – derivada de los trabajos necesarios para la creación de escombreras, del tráfico de volquetes, del bombeo y de la descarga de efluentes, de la generación de vías de saca y de tareas de mantenimiento de los equipos o maquinaria.

En la tabla siguiente se presenta un resumen de las cuestiones que se van a tratar en los apartados siguientes de un modo más amplio, con ejemplos de aplicación de estas medidas y los resultados que ofrecen.

**Tabla 3.8 Manejo de Materiales durante el proceso minero**

	MATERIAL	TRATAMIENTO O DISPOSICIÓN FINAL	COMENTARIOS
SOLIDOS	Material orgánico de recubrimiento	Almacenado (stockpile) para sus uso posterior en rehabilitación	Hay que proteger los suelos orgánicos contra erosión. Hay que vigilar la composición de estos materiales para evitar que se produzcan aguas ácidas por el contacto de minerales sulfurados con el ambiente.  Evitar que los materiales finos acaben en los cauces de los ríos.
	Estéril	Depositado en escombreras	Potencial de generación de agua ácida. Se requiere investigación de DAM. Se pueden usar estos materiales como áridos para desarrollar zonas adecuadas para el emplazamiento de viviendas en las cercanías de la mina, firmes de carretera, etc., que favorezcan a la comunidad que rodea el emplazamiento.
	Mineral	Procesado para extraer el metal o producir un concentrado	
	Materiales industriales (llantas, tubos, madera etc)	Acumulación en un Centro de Manejo para su reciclaje, o disposición final de acuerdo a la normativa	En el caso de materiales peligrosos o tóxicos, la disposición final debe realizarse en un vertedero autorizado.
	Agua de mina	Recuperada y usada en el proceso o tratada hasta que cumple con la normativa y descargada	En zonas áridas, la evaporación es un método de eliminación de agua contaminada; sin embargo debe priorizarse su reuso dentro o fuera de la operación. Opción de depuración con sistemas de tratamiento pasivo.
	Efluentes del proceso (p.ej. refino)	Recirculado y eventualmente tratado o enviado a una planta autorizada	La evaporación de los efluentes es una opción en zonas áridas y semiáridas; sin embargo debe priorizarse el reuso. Los residuos sólidos remanentes deben ser dispuestos en un vertedero autorizado.
LIQUIDOS			

	MATERIAL	TRATAMIENTO O DISPOSICIÓN FINAL	COMENTARIOS
LIQUIDOS/SOLIDOS	Concentrado	Procesado en una fundición y refinería para recuperar el metal	Derrames de concentrado pueden contener altos niveles de metales.
	Lodos	Se recupera una parte menor del agua de proceso en espesadores.  Disposición convencional en balsa con recuperación adicional del agua.	El proceso por espesadores o la producción de pasta son métodos para recuperar agua adicional.
	Partículas	Control de emisiones por riego de caminos y áreas expuestas	Es importante realizar un monitoreo durante un período de hasta 2 años e identificar posibles receptores (zonas pobladas, ecosistemas delicados etc).
EMISIONES	Gases	Control de emisiones de chimeneas de fundiciones y control de emisiones de vehículos	Instalar sistemas de captación de gases y/o “scrubbers”, y plantas de producción de ácido sulfúrico en el caso de emisiones de SO <sup>2</sup> .

### 3.4.4 Gestión de los Flujos de Agua

#### 3.4.4.1 Balance de Agua de la Operación

Manternerse informado respecto al balance de agua en la operación permite saber el volumen de agua dentro de la operación, incluyendo el agua en canales o tuberías entre componentes de la operación. El uso de modelos de simulación, por ejemplo durante un aumento en el nivel de producción, indicará los impactos a lo largo del sistema de agua dentro de la operación. La medición de factores, como evaporación, humedad de relaves o concentrado además de los flujos entrando y saliendo de la operación, permite identificar puntos críticos de uso/pérdida (Figura 3.10), y también permite la elaboración de Cuentas de Agua (Figura 3.11) – un registro de los componentes del balance de agua durante un período de tiempo que clasifica los usos y su productividad.

El concepto del Balance de Agua no es complicado, pero algunos de los componentes son difíciles



de medir o estimar, por ejemplo los ingresos y las salidas de agua subterránea.

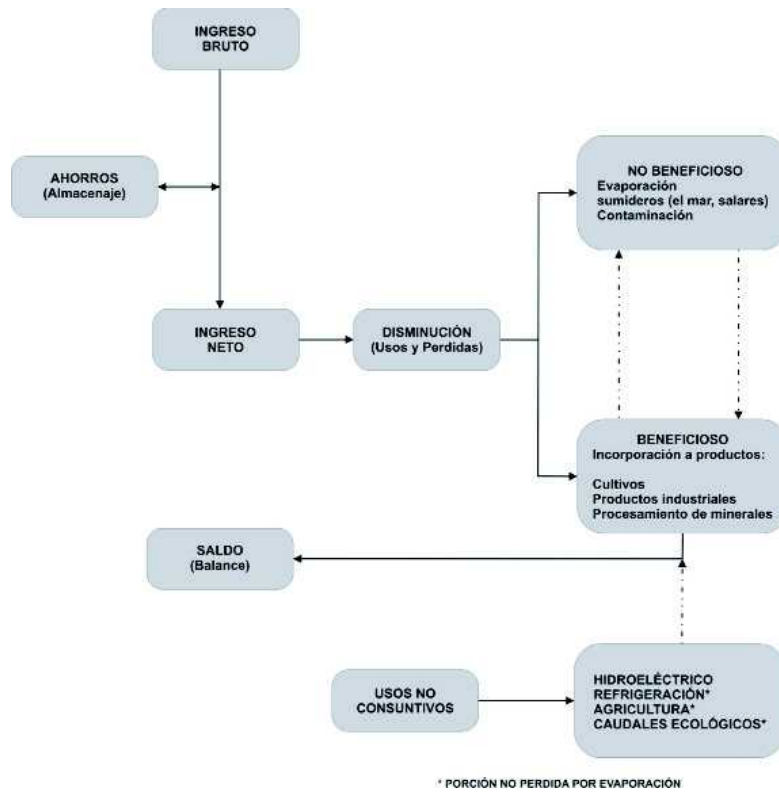


Figura 3.10 Balance de Agua

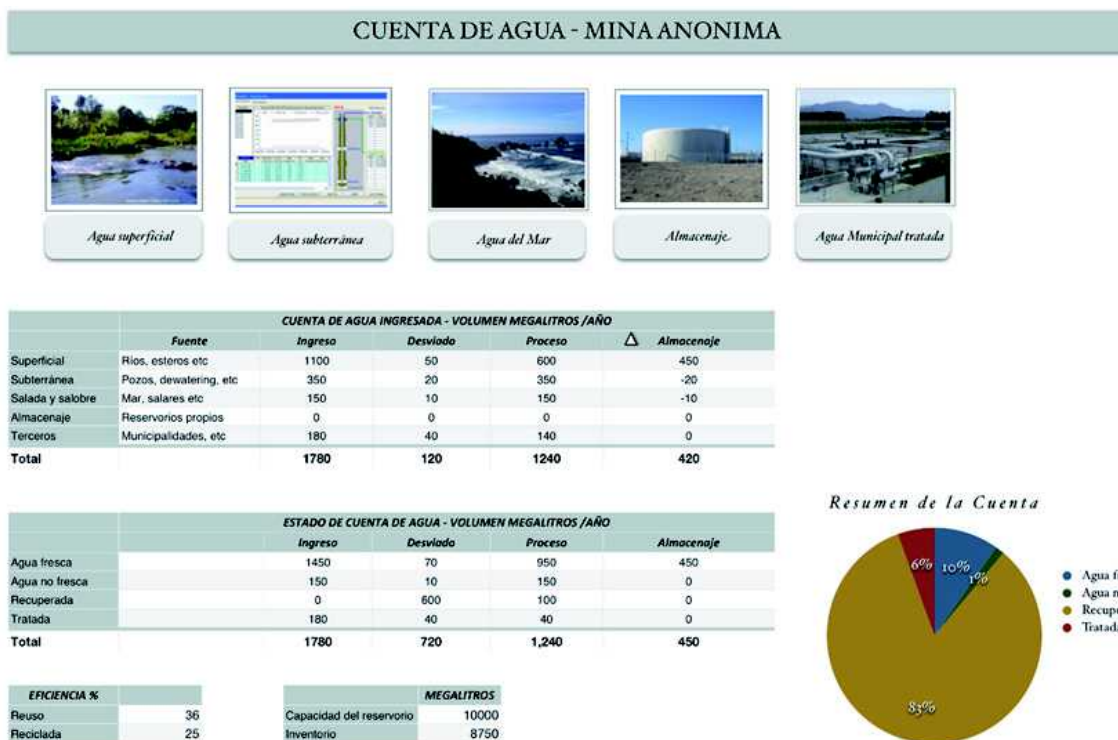


Figura 3.11 Balance de Agua (Mina Ficticia, Basado en DRET, 2008)

### 3.4.4.2 Gestión dentro de cada componente de la operación (balance de agua por componente)

La gestión del uso de agua dentro de una operación minera debe desagregarse por componente para identificar el consumo y cualquier cambio de calidad en cada componente del proceso (Figura 3.12).

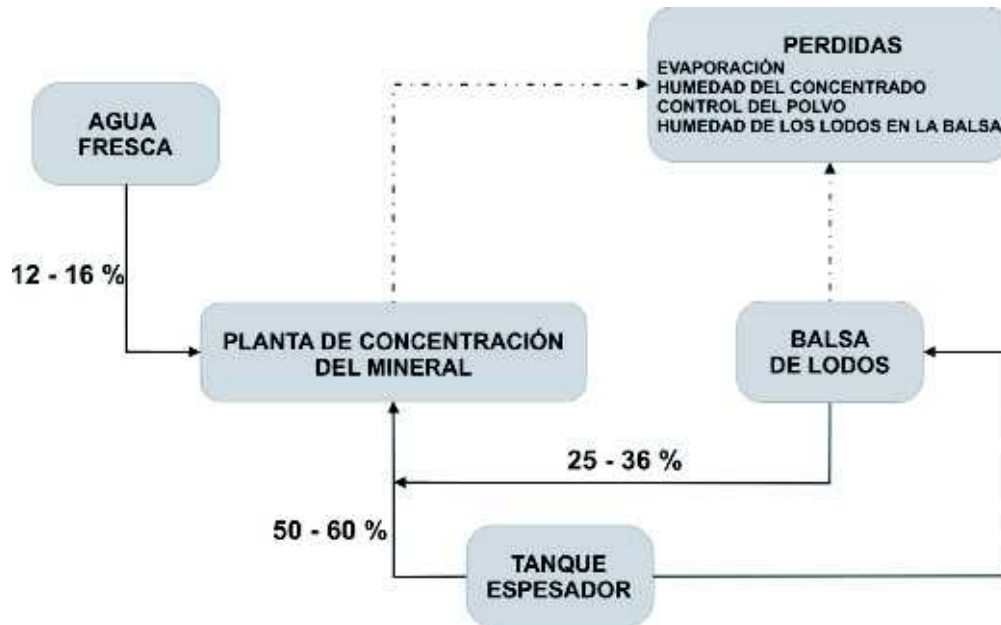


Figura 3.12 Ejemplo de un Balance de Agua por Componente

### 3.4.4.3 Posibles fuentes de Contaminación del Agua

Una de las fuentes principales de contaminación de agua producida por las actividades mineras es la generación de aguas ácidas que resultan de la reacción de minerales sulfuros (especialmente pirita y calcopirita) con el agua y el oxígeno en el aire. El tema de la generación de aguas ácidas y su prevención y tratamiento se explica con más detalle en la Sección 3.4.5. También se puede producir una contaminación dispersa derivada de las labores de mantenimiento de la maquinaria minera.

Tabla 3.9 Fuentes de contaminación de Aguas de Mina

Contaminante	Fuente típica de generación
Metales - hierro, manganeso, zinc, plomo, cobre	La oxidación de la pirita de las operaciones mineras, la superficie de roca y arenas de los vertederos, las balsas de lodos con disolución de metales.
Sulfatos	La oxidación de la pirita de las operaciones mineras, la superficie de roca y arenas de los vertederos, las balsas de lodos con disolución de metales.

Contaminante	Fuente típica de generación
Cianuro	Zonas de vertido de la planta, rotura de tuberías y balsas de lodos. Sólidos en suspensión Escorrentía de las escombreras, escorrentía de las balsas de lodos, etc.
Sodio	Sodio usado en la neutralización de productos químicos.
Cloro	Roturas de las tuberías de abastecimiento.
Compuestos nitrogenados	Residuos de los explosivos, el gas de los subproductos de los explosivos, las aguas residuales y de escorrentía de las zonas residenciales.
Fosfatos	Las aguas residuales y de escorrentía de las zonas residenciales.
Acidez	La oxidación de la pirita de las operaciones mineras, la superficie de roca y arenas de los vertederos, las balsas de lodos con disolución de metales.
Radionucleidos	La oxidación de la pirita de las operaciones mineras, la superficie de roca y arenas de los vertederos, las balsas de lodos con disolución de radionucleidos.
Microbios, coliformes fecales, etc.	Las aguas residuales mal tratadas, el pastoreo de ganado.

#### ***3.4.4.4 Evolución de la demanda de Agua a lo largo del Ciclo de Vida***

La demanda de agua varía enormemente durante el ciclo de vida de un proyecto minero (ver Figura 3.13). Durante la etapa de exploración la demanda es mínima, suficiente para las perforaciones para recuperar testigos de roca para el análisis mineralógico y agua doméstica para el personal de investigación. La demanda aumenta en la fase de construcción, llegando a su máximo durante la fase de explotación. Durante las fases de clausura y post-cierre, la demanda va disminuyendo y se acerca a las condiciones de línea base. Sin embargo, hay que destacar que normalmente queda una demanda de agua remanente a largo plazo, debido a procesos de evaporación en las estructuras creadas por la explotación (p.ej. lagos de tajo, galerías de drenaje, humedales de tratamiento de agua, etc.).

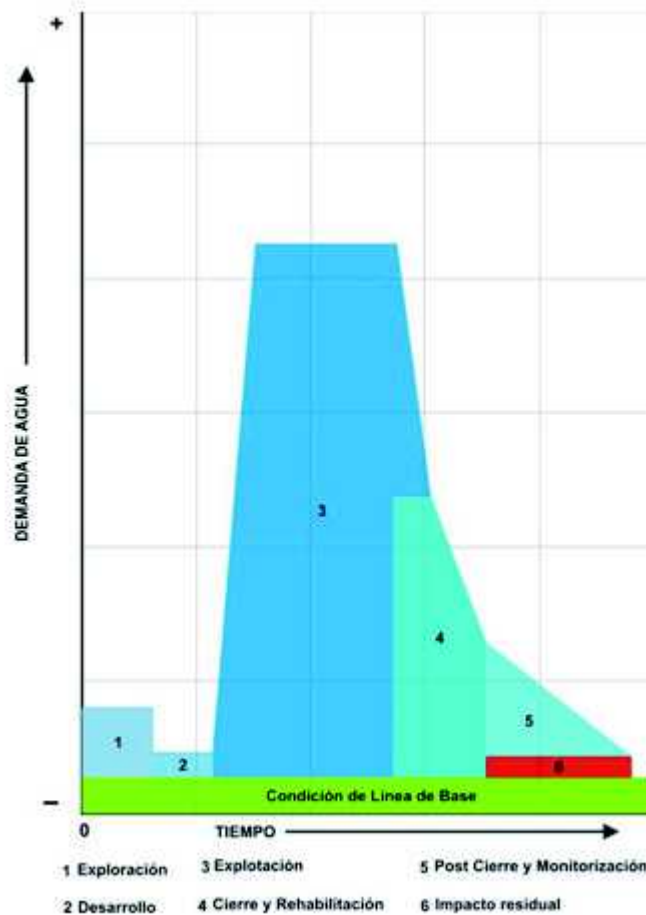


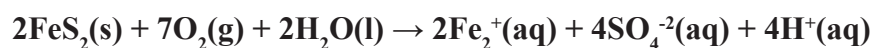
Figura 3.13 Variación de la demanda durante la vida de un proyecto minero

### 3.4.5 Drenaje Ácido

El Drenaje Ácido de Mina (DAM) o Drenaje Ácido de Roca (DAR) se refiere a los flujos de efluentes ácidos provenientes de operaciones mineras o de minas abandonadas, producidas por las reacciones químicas entre el agua subterránea o superficial, algunos elementos minerales de las rocas (sulfuros) y el oxígeno del aire. Los minerales sulfurados presentes en las rocas (especialmente la pirita) son oxidados por el oxígeno disuelto en el agua, reacción que se acelera por la presencia de una bacteria conocida como *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Por otra parte, se sabe que existen varios procesos químicos que contribuyen a la generación de DAM, pero es la oxidación de la pirita y la calcopirita la que produce la mayor contribución a este drenaje.

#### 3.4.5.1 Descripción Química de la Formación de Drenaje Ácido

La ecuación general que describe el proceso es:

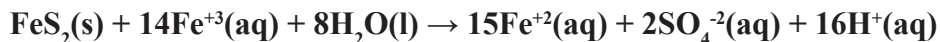


La oxidación de los sulfuros a sulfatos hace soluble el hierro ferroso ( $\text{Fe}_{+2}$ ), el cual se oxida a hierro

férrico ( $\text{Fe}_{+3}$ ):



La presencia de microorganismos cataliza la reacción. El hierro férrico producido también puede oxidar más pirita:

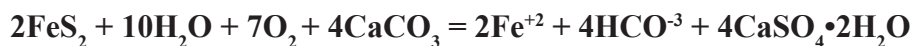


El efecto de las reacciones es liberar  $\text{H}^+$ , lo que produce el descenso del pH y mantiene la solubilidad del ión férrico. La generación de drenaje ácido, además de disminuir el valor de pH, aumenta la solubilidad y el transporte de los metales pesados.

Generalmente, las descargas de DAM se producen en minas donde las asociaciones minerales están formadas por sulfuros, especialmente pirita, en su mineralización. En muchos casos el metal predominante es el cobre, el níquel o el zinc. El mineral de cobre más común es la Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), y es por la presencia de este mineral que las minas de cobre son potencialmente grandes generadoras de DAM. Las minas subterráneas, los desmontes (escombreras) y las balsas de lodos son las principales fuentes de generación de DAM en las minas.

#### 3.4.5.2 *Minerales Generadores de Acidez (MGA)*

El DAM formado por las reacciones descritas en el apartado anterior puede ser puesto en libertad de inmediato con el agua que se extrae de una mina de explotación, o puede ser retenido en los espacios de poros en las rocas de la mina. La oxidación de sulfuros también puede formar producto sólidos, como los minerales secundarios de sulfato (Younger, 2000 y Banks, 2004), por ejemplo yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), melanterite ( $\text{Fe}^{\text{II}}\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) o jarosita ( $\text{HFe}^{\text{III}}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ):



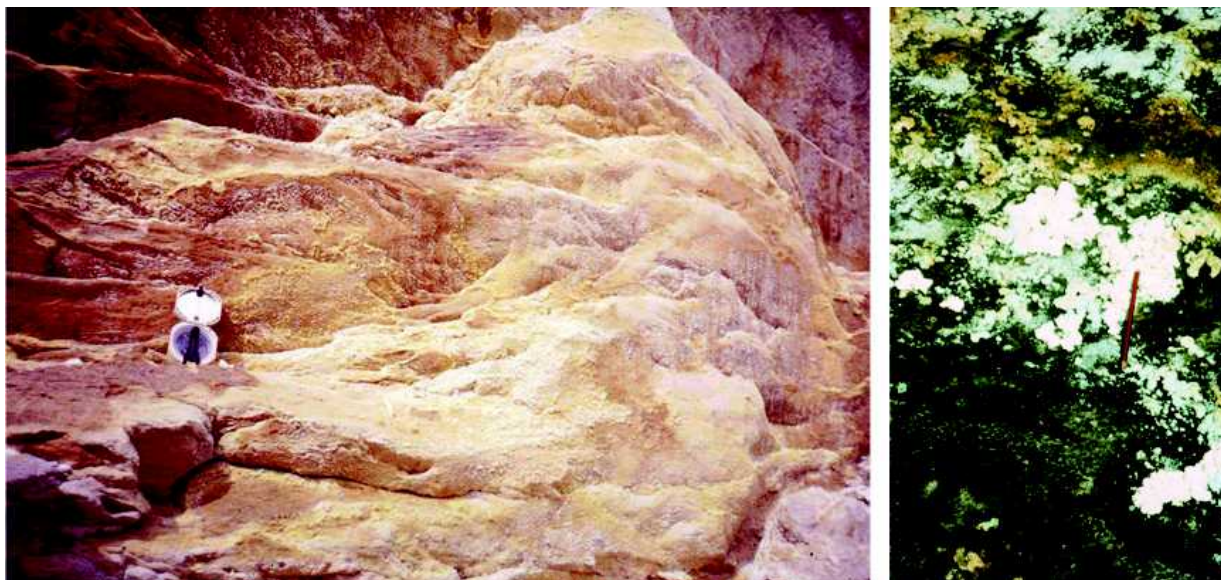
Otros ejemplos de minerales secundarios de sulfato que pueden producirse en entornos mineros incluyen

- Coquimbita:  $\text{Fe}^{\text{III}}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
- Copiapita:  $\text{Fe}^{\text{II}}\text{Fe}^{\text{III}}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
- Römerita:  $\text{Fe}^{\text{II}}\text{Fe}^{\text{III}}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
- Alunita:  $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{OH})_6$
- Jurbanita:  $\text{AlSO}_4\text{OH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- Otros miembros de la familia de jarositas o alunitas, por ejemplo Na-jarosita:  $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{OH})_6$

Estos minerales se acumulan a menudo en las paredes de las labores mineras (Fig. 3.14) donde van acumulando cantidades importantes de metales fácilmente solubles. En las zonas áridas y semiáridas

das la acumulación de MGA puede ser mucho más fuerte que en zonas húmedas.

Mientras las labores están secas esta acumulación de contaminantes no se nota en la calidad de aguas, pero cuando se inundan las labores (habitualmente durante el cierre) estas sales se disuelven y generan aguas fuertemente ácidas y contaminadas. Este fenómeno se denomina “primer lavado” (Younger, 1997) y se explica con mas detalles en la Sección 3.5.2.2.



*Figura 3.14 Ejemplos de Minerales Generadores de Acidez. Izquierda: en el Tajo de una Mina al Cielo Abierto de Oro, Ghana. Derecha: Aluminocopiapita (blanco) encima de Szomolnokita (turquesa) en una Galería Subterránea, Milluni, Bolivia.*

### **3.4.5.3 Metodologías de Predicción de Generación de Aguas Ácidas**

En la Sección 3.2.5 se trata la gestión de los impactos de largo plazo, que pueden producirse en la fase de cierre y post-cierre de la mina. Una de los principales impactos es la generación de aguas ácidas que resultan de la reacción de minerales sulfuros (especialmente pirita y calcopirita) con el agua y el oxígeno en el aire. La generación de agua ácida no depende solamente de la presencia de minerales que pueden generar ácido sino también de la presencia de minerales que pueden neutralizar el ácido, p.ej. calizas. Las reacciones químicas involucradas en la generación de aguas ácidas son complejas y es aconsejable realizar pruebas sobre la roca durante la fase de investigación (pre-factibilidad) para averiguar la existencia y posible alcance del problema. En los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) es normalmente un requerimiento realizar investigaciones respecto al potencial de generación de aguas ácidas.

Hay una serie de técnicas de predicción que van desde las más simples a las más complejas que se pueden utilizar para determinar la reactividad de los materiales y probable composición de los lixiviados (Tabla 3.10). Muchas de estas pruebas son complementarias y se recomienda por lo menos usar dos de ellas para obtener la suficiente confianza en la predicción.

**Tabla 3.10 Pruebas Típicas para Determinar el Potencial de Generar Ácido**

TIPO	PRUEBA	DURACION	DESCRIPCION
Simples – estáticas	Evaluación ácido-base (Acid Base Accounting, ABA)	1 semana	Indicativo del potencial de generar ácido
	Generación neta de ácido (Net Acid Generation, NAG)	1 semana	Indicativo de la generación y neutralización de ácido
Simples – cinéticas	Celdas de roca In-Situ	3-6 meses	Se establecen celdas con la roca a probar, expuesta a la intemperie. Se colecta el agua de precipitación que filtra por la celda para medir los cambios de pH durante un período de meses
	Columnas de roca en laboratorio	3-6 meses	Similar a las celdas en terreno pero se arman columnas (tubos verticales) de la roca y se infiltra agua de pH conocido con medición del pH después de percolar por la columna
Mineralogía	Pruebas mineralógicas en laboratorio	2-4 semanas	Se pueden realizar pruebas mineralógicas en paralelo con las pruebas metalúrgicas usadas para determinar los procesos de separación y refinación del mineral

Las metodologías de predicción se pueden dividir en dos tipos básicos: estáticas y cinéticas.

Los métodos estáticos incluyen pruebas de laboratorio sobre material finamente pulverizado e incluyen el estudio mineralógico, análisis de la matriz de la roca, evaluación ácido-base (ABA) y generación neta de ácido (NAG). La ventaja de estos ensayos es que son relativamente baratos y fáciles de ejecutar, especialmente en comparación con los ensayos cinéticos. En consecuencia, estos ensayos (especialmente el ABA) son los que más se aplican. Sin embargo, los resultados se deben tratar solamente como indicativos que deben de ser evaluados en relación con otros datos geoquímicos y mineralógicos, para no dar lugar a graves errores de interpretación.

Un elemento importante en zonas áridas es la falta de lluvia y escorrentía, especialmente en zonas desérticas encontradas en el sur del Perú y el norte de Chile. Aunque la roca puede tener el potencial de generar ácido, la ausencia de lluvia significa que en la práctica no hay generación de aguas

ácidas, o si la hay, el área de influencia e impacto es muy limitada y puede ser controlada con la instalación de canales de contención.

Las pruebas cinéticas incluyen ensayos en columna o pruebas de lixiviación en pila en los que el tamaño de las partículas de ensayo se acerca más a los reales y se simula la percolación del agua a través del material para evaluar la influencia de la infiltración del agua de lluvia.

En la industria minera se usan diferentes ensayos para caracterizar la reacción de los desechos en respuesta al contacto con el agua. Los ensayos incluyen el Protocolo de Lixiviación Precipitación Sintética (Synthetic Precipitation Leaching Protocol (SPLP) desarrollado por la US-EPA (EPA 1312). El ensayo está diseñado para evaluar la potencial movilidad de los metales y metaloides en los desechos mineros sujetos a la infiltración de aguas lluvias. Los datos de la prueba SPLP pueden proveer indicaciones sobre el riesgo atmosférico, asociado al almacenamiento permanente de los desechos. Los datos también podrían ayudar a establecer el criterio de diseño para las barreras o cubiertas en el caso que se considere viable la opción de almacenar los desechos in situ.

Para identificar el riesgo de almacenar materiales potencialmente tóxicos se puede utilizar la Prueba de Extracción en Base Fisiológica (Physiologically Based Extraction Test (PBET) (Intawongse y Dean, 2008) que mide la carga de contaminantes con posibilidad de ser bioasimilada por seres humanos y/o animales como consecuencia de la ingesta de desechos mineros metalíferos, suelo o polvo. La prueba PBET es ampliamente usada por las agencias reguladoras para evaluar los riesgos ecotoxicológicos y son de mayor relevancia que los valores de concentraciones totales para desarrollar estrategias de manejo / remediación de los desechos mineros.

Hoy en día es normal realizar una investigación y un modelo hidrogeológico e hidroquímico para averiguar el potencial de una mina a cielo abierto o una mina subterránea para generar agua ácida, y diseñar de este modo las medidas preventivas y/o conseguir minimizar sus impactos. El programa más utilizado es PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999).

Existen numerosos estudios que se realizaron para predecir la generación de aguas ácidas, muchos de ellos son accesibles vía web, y pueden dar una orientación adecuada sobre la gestión de los estériles generadores de drenaje ácido. Destaca entre ellos (Bennet et al., 2000). En él se describen los ensayos de un modo resumido, así como casos de estudio y una discusión sobre la influencia de los diversos factores, la acción del oxígeno, el tamaño de las partículas, la temperatura, etc. La Guía GARD<sup>3</sup> también contiene información exhaustiva y actualizada sobre todos los aspectos de drenajes de mina.

#### ***3.4.5.4 Prevención y Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina***

Las acciones de mitigación de los impactos de las aguas ácidas dependen en gran medida de las características físicas y químicas del lugar, pero están generalmente divididas en dos grupos:

- Acciones Preventivas
- Acciones de Tratamiento

---

3 [www.gardguide.com](http://www.gardguide.com)



Las acciones preventivas, que se tratan en esta sección, tienen el objetivo de separar la roca reactiva del agua, del aire o de ambos, para que las reacciones químicas, indicadas anteriormente no ocurran. Las acciones de tratamiento se explican en la sección 5.4.2 de los pasivos mineros.

En zonas húmedas es difícil lograr la separación de las grandes masas de roca expuestas en las minas, pero en zonas áridas, con un poco de planificación, se puede desviar la escorrentía superficial alrededor de las zonas en explotación y escombreras o protegerlos con cubiertas especialmente diseñadas para ello.

A continuación se explican de forma breve los métodos principales de prevención o mitigación de DAM. Para mayor detalle se puede consultar por ejemplo la guía GARD .

### **Evitar**

Con una exploración y planificación adecuada se puede evitar de extraer cuerpos de roca muy reactivas, cuyos costes de tratamiento posterior no serían económicamente rentables.

### **Re-explotación**

En muchos casos puede ser rentable volver a explotar minas abandonadas. Se puede extraer mineral adicional, o reprocesar relaves con métodos más eficientes de recuperación. Estos trabajos se pueden aprovechar para volver a ubicar o cubrir residuos generadores de DAM.

### **Gestión selectiva**

Hay varias opciones:

- Separar los materiales generadores de DAM de los materiales inertes y depositarlos en vertederos distintos.
- Encapsulado o deposición por capas.
- Mezcla de residuos ácidos y alcalinos para neutralizar el potencial de generar DAM.

Mezcla de residuos gruesos (escombros) y fino (lodos) para reducir el flujo de agua y oxígeno a través de los residuos.

### **Aditivos y enmiendas**

Opciones incluyen:

- Pasivación de sulfuros para cubrirlos de una capa inerte. Aún está en fase de prueba.
- Adición de materiales alcalinos para compensar la acidez de los residuos. Posibles materiales alcalinos incluyen caliza, cal viva, cenizas volantes, escorias alcalinas, etc. Hay que asegurar que estos materiales no liberen a su vez contaminantes.
- Adición de materia orgánica para consumir oxígeno y promover la precipitación de metales como sulfuros. Sin embargo, las condiciones reductoras pueden volver a disolver hidróxidos de Fe, Mn etc.
- Adición de bactericidas para reducir la oxidación de sulfuros.

## **Gestión de aguas**

Opciones incluyen:

- Desvíos de aguas externas o desagüe de las labores mineras para evitar el contacto del agua con la roca generadora de DAM.
- inundación de labores para reducir el contacto con oxígeno. En el caso de la roca expuesta en minería a cielo abierto o minas subterráneas, ubicadas por debajo del nivel freático, la inundación de la mina reduce la acción del oxígeno en el aire y así mismo la generación de ácido, pero no de manera completa debido a la presencia de oxígeno disuelto en el agua.
- Sellado de galerías subterráneas para reducir el movimiento de aguas contaminadas o el ingreso de aguas limpias. Sin embargo, se pueden generar presiones de agua muy considerables detrás de estas estructuras. Hay que diseñarlas y construirlas con mucho cuidado para evitar roturas catastróficas.

## **Impermeabilización**

La impermeabilización del fondo de escombreras o balsas de lodos puede mantener condiciones saturadas dentro de los residuos y proteger el suelo y las aguas subterráneas por debajo de ellas. Cubiertas secas

Las cubiertas secas se construyen para minimizar la infiltración de agua en los residuos. Se tratan con más detalle en la sección 3.4.10.

## **Cubiertas húmedas**

Las cubiertas de agua reducen el acceso de oxígeno a los residuos para ralentizar su oxidación. En zonas áridas raramente son una opción a largo plazo (ver también la sección 3.4.10).

### **3.4.6 Mejores Técnicas Disponibles para la Gestión del Agua**

#### ***3.4.6.1 Uso Eficiente de Agua***

El recurso mineral no tiene valor en sí mismo, la actividad minera se lo da y para ello se requiere el uso del agua, que es un insumo básico para la minería. Por lo tanto debe ser cuidado como tal para una producción y un aprovechamiento sostenible. En la actividad minera existe acuerdo sobre la necesidad de una gestión integrada del uso del agua para asegurar su uso racional y la conservación de su calidad.

La industria minera moderna puede dar un buen ejemplo en el uso eficiente del agua, aplicando las mejores tecnologías disponibles (sin costos excesivos – ‘BATNEEC’ en sus siglas en inglés), para incentivar a otros sectores de modernizar sus tecnologías.

Las acciones recomendadas para mejorar y hacer más eficiente el uso del agua incluyen las siguientes:

- Gestión de fuentes
- Mejorar la extracción, transporte, almacenamiento y distribución del agua
- Reducir o eliminar escapes y filtraciones
- Reducir el consumo en operaciones:
  - Plantas concentradoras
  - Plantas hidrometalúrgicas
  - Fundiciones y refinerías
- Gestión por separado de distintos tipos de agua
- Tratamiento de aguas residuales

Aparte, existen algunas tecnologías nuevas para mejorar el abastecimiento y el uso de agua en las operaciones mineras. Las investigaciones especializadas y el uso de modelos matemáticos o computacionales son esenciales en la consideración del manejo eficiente del agua.

### **Gestión de fuentes**

Cualquier gestión de la fuente de agua debe ser acompañado por un buen control de los ecosistemas que se abastecen de las mismas fuentes para mantener la conservación de los hábitats y de las especies que los habitan.

### **Mejorar la extracción, transporte, almacenamiento y distribución del agua**

Las mejores prácticas relacionadas con la gestión y distribución del agua dentro del área de la mina incluyen:

- Un sistema de conducción y almacenamiento bien planificado
- Mantenimiento preventivo y mecanismos de detección de fugas
- Monitorización permanente del volumen y calidad de agua dentro del sistema

### **Reducir o eliminar los escapes o filtraciones de agua**

Uno de los principios básicos de sustentabilidad en las labores mineras se encuentra centrado en la optimización ambiental de sus operaciones, reduciendo y/o eliminando las fugas al sistema, sean estas líquidas, sólidas, o gaseosas.

Asimismo, la reducción de escapes de agua puede incidir significativamente en el medio ambiente. Al prevenir, ubicar y reparar los escapes, se reduce la cantidad de agua requerida de fuentes naturales para los procesos mineros, reduciéndose de esta forma la demanda consuntiva de agua. En muchas zonas áridas y semiáridas la reducción de escapes de agua puede aliviar en gran parte las medidas necesarias para combatir la sequía.

### **Reducción del consumo en operaciones**

La reducción del uso de agua fresca involucra no solamente las medidas de gestión de las fuentes y la distribución, sino también mejoras en los procesos del mineral. Se debe analizar el consumo

histórico de agua en relación con los niveles de producción para identificar acciones o cambios en el proceso o los equipos que han producido reducciones o aumentos en el uso.

El tratamiento de los minerales sulfurados, la flotación, el transporte de concentrados y relaves, y la infiltración y evaporación en los depósitos de relaves representan el uso mayor de agua. La flotación se realiza normalmente a una tasa que varía entre un 25% y un 40% de sólidos. Esta cifra significa que los requerimientos de agua en el proceso de flotación pueden fluctuar entre 1,5 y 3 m<sup>3</sup>/tonelada de mineral.

La mayor parte del agua usada en el proceso de flotación pasa a formar parte del Lodo. Aunque el lodo de flotación pasa por un proceso de espesamiento para recuperar agua, una parte importante del agua forma parte del flujo de los relaves que llega al depósito final (dique o tranque de relaves). En el proceso de deposición de relaves hay una separación natural de las fracciones gruesas y finas de los relaves y también del agua de los sólidos. Alrededor de un 18% del agua se mantiene “capturado” dentro de los espacios intergranulares de los relaves, y el resto está disponible para ser recuperado y devuelto al proceso para su reuso. Sin embargo, durante el proceso de deposición de los relaves y la separación del agua de los sólidos, una porción importante del agua se pierde por evaporación. Otra porción también se pierde por la infiltración hacia el suelo por debajo de la balsa de lodos. El consumo real de agua fresca en las plantas concentradoras varía entre 0.3 y 2.1 m<sup>3</sup>/tonelada de mineral. (COCHILCO, 2008).

En plantas concentradoras que procesan en el orden de 30.000 a 40.000 toneladas/día de mineral de cobre, se puede aumentar la recuperación de agua por espesadores de capacidad alta (Proceso Baker) o usando filtros tipo prensa. En las plantas que procesan mayores toneladas de mineral el volumen de relaves es demasiado grande para ser factible.

En las plantas hidrometalúrgicas la pérdida más significativa es por la evaporación en las pilas de lixiviación. El proceso de lavado de las pilas una vez agotado el mineral también requiere cantidades importantes de agua. La práctica más moderna es instalar los sistemas de riego inmediatamente bajo superficie para evitar evaporación.

Las refineras y fundiciones de cobre requieren oxígeno, obtenido de agua, y también usan agua para enfriar los gases en el proceso de producción de ácido. El consumo de agua fresca en las fundiciones de cobre es en el orden de 6 m<sup>3</sup>/tonelada de concentrado procesado.

### **Gestión por separado de diferentes tipos de agua**

Donde sea posible, hay que evitar que aguas limpias se mezclen con aguas contaminadas, o que entren en contacto con sólidos que puedan contaminarlas. De esta forma, se minimiza el volumen de agua que necesite tratamiento, y se conserva agua limpia para otros usos.

### **Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento y reuso de agua tratada puede reducir considerablemente la demanda de agua de la operación.

### 3.4.6.2 Descarga Cero

El principio de la “descarga cero” es reciclar todas las aguas residuales de un proceso industrial. Esto significa que las aguas residuales sean tratadas y usadas de nuevo en el proceso. Debido a la reutilización del agua las aguas residuales no son vertidas al sistema de alcantarillado o a las aguas superficiales.

En las zonas áridas y semiáridas, es una práctica habitual evaporar las aguas contaminadas para que no sean descargadas al medio ambiente. Sin embargo, esta tecnología se debe usar con precaución, ya que el agua evaporada ya no estará disponible para otros usos en la cuenca aguas abajo de la operación minera. Como se verá en el ejemplo siguiente, la evaporación indiscriminada de aguas para evitar su descarga puede tener graves consecuencias en cuencas áridas y semiáridas:

#### UN MAL EJEMPLO: PROVOCANDO PROBLEMAS GRAVES POR LA APLICACIÓN ‘CIEGA’ DE UNA POLÍTICA DE DESCARGA CERO

En una mina de oro en una zona semiárida se implementó una política de descarga cero mediante la construcción y uso de una enorme balsa de evaporación. Se evaporaron todas las aguas:

- Las aguas usadas en el beneficio de la mena, y que podrían contener cianuros.
- Las que se encontraron en las labores de la mina, que fueron ácidas / metalíferas, y/o tenían una posibilidad de haber estado en contacto con los cianuros.
- Las aguas bombeadas de acuíferos regionales fuera de la mina, para prevenir su ingreso a la mina.

Al evaporar las aguas subterráneas de los acuíferos externos:

- se secaron varios kilómetros del río principal de la región
- se bajó la capa freática alrededor de la mina, hasta que docenas de pozos particulares se dejaron sin agua

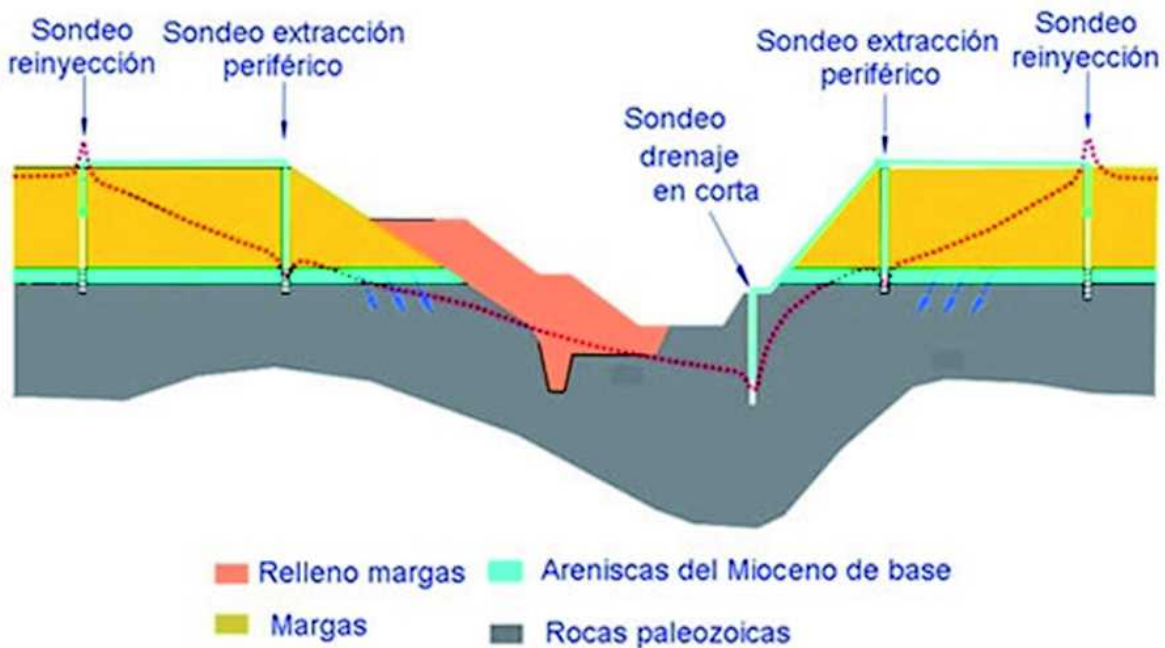
La mejor práctica hubiera sido descargar las aguas de los acuíferos externos al río aguas abajo de la mina (gestión por separado de diferentes tipos de agua), o reinyectarlas a una distancia razonable de la mina.

La práctica preferible en zonas áridas y semiáridas es, en vez de realizar una descarga cero de agua, implementar una política de descarga cero de contaminantes: La descarga de agua tratada, siempre bajo una monitorización transparente de su calidad, puede proporcionar agua adicional a otros usuarios aguas abajo en la cuenca. Por ejemplo, en Sudáfrica varias empresas mineras en el Río Olifants están depurando sus aguas residuales para devolverlas al río y aumentar su caudal.

### 3.4.6.3 Sistemas de Bombeo-Reinyección

En la actualidad en el caso de operaciones mineras en zonas áridas y semiáridas está tomando cierta relevancia el método de bombeo y reinyección al acuífero. Con esta técnica se logra mantener

el frente de trabajo seco y proteger el acuífero, dado que no se produce sustracción de agua. Esta técnica se está usando actualmente p.ej. en las explotaciones mineras de Cobre las Cruces (España), Yaniconda (Australia) y Betz Post (Nevada), y muestra unos resultados excelentes.



*Figura 3.15 Modelo de Bombeo – Reinyección en Cobre las Cruces. (CLC, 2008)*

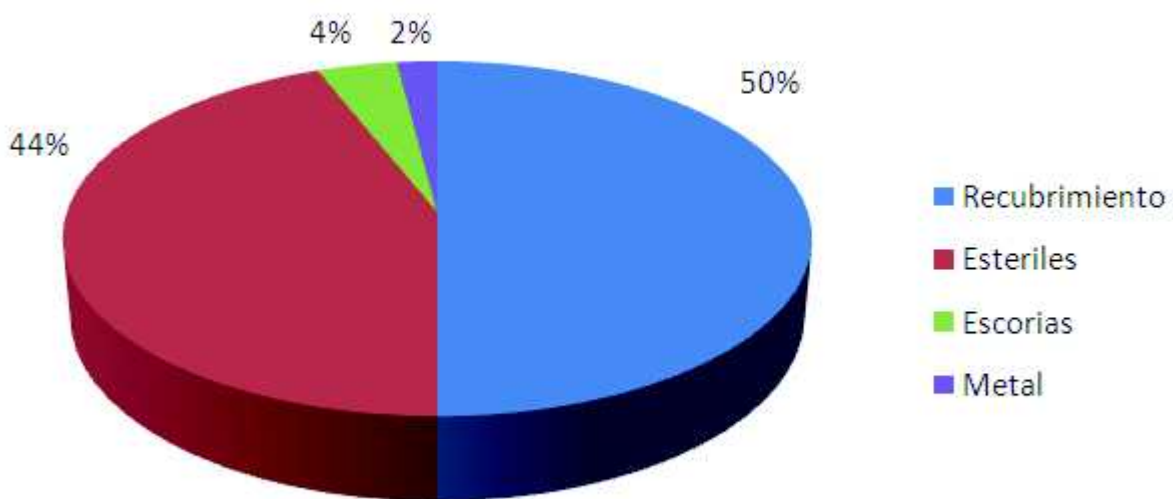
El caudal bombeado para abatir el nivel freático es reinyectado en la misma formación a varios kilómetros de distancia. En la mina de Cobre Las Cruces, España, se reinyecta a 2-3 Km de la zona de bombeo (Fernández Rubio, 2005). En el caso de la mina Betz Post una parte del agua bombeada (5%) se utiliza en las operaciones de la mina, el 10% es usado para el regadío de más de 2000 hectáreas, reinyectándose el resto al acuífero (Loredo et al, 2009).

#### **3.4.6.4 Oportunidades de reutilización o reciclaje de agua**

Con un control y registros del uso de agua en cada etapa de la operación, incluyendo usos domésticos, se pueden identificar oportunidades de reducir el consumo o re-usar el agua. La reutilización puede ocurrir dentro de un componente y no solamente desde el final del proceso.

#### **3.4.7 Material de Recubrimiento y Estéril**

Dadas las características de la minería metálica, el mayor volumen de residuos generados durante las operaciones es de carácter sólido. La mayor parte procede del recubrimiento superior de la capa mineralizada. Se disponen en ubicaciones especiales, denominadas escombreras, y con una geometría definida en función de diversas características intrínsecas del material y la morfología del terreno. En el caso de la minería subterránea, en algunos métodos de explotación se puede usar este material estéril para el relleno de los huecos de explotación para mantener la estabilidad de la misma.



*Figura 3.16 Relación entre Metal Obtenido y Desechos Generados*

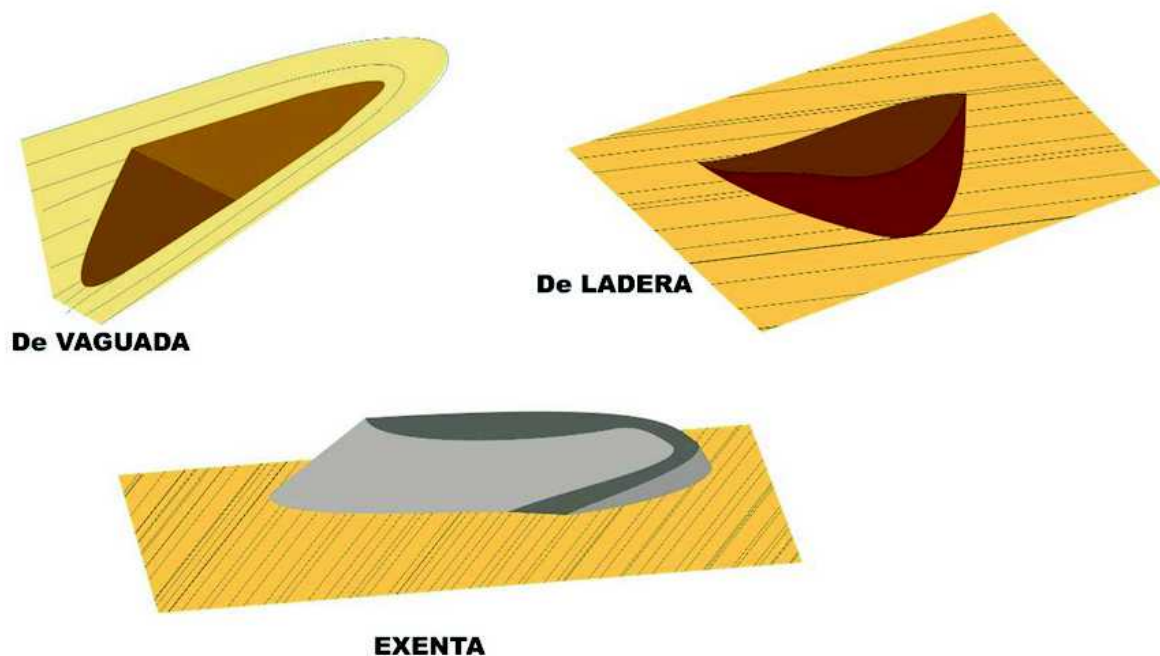


*Figura 3.17 Aspecto típico de los Estériles de una Escombrera*

### 3.4.7.1 Factores para la Ubicación de las Escombreras

La elección del emplazamiento de una escombrera se basa en criterios técnicos-económicos y ambientales. Uno de los criterios más importantes es el que tiene en cuenta el punto de transporte desde la explotación hasta la escombrera, ya que esto afecta al coste total de la operación debido a que a mayores distancias es necesaria una flota de vehículos mayor. Por otra parte la capacidad de almacenamiento necesaria para el volumen extraído durante la vida de la operación minera es un factor importante que también determina el emplazamiento. También hay que considerar los posibles impactos que pudieran producirse sobre el medioambiente y las restricciones que pudieran existir en el área elegida.

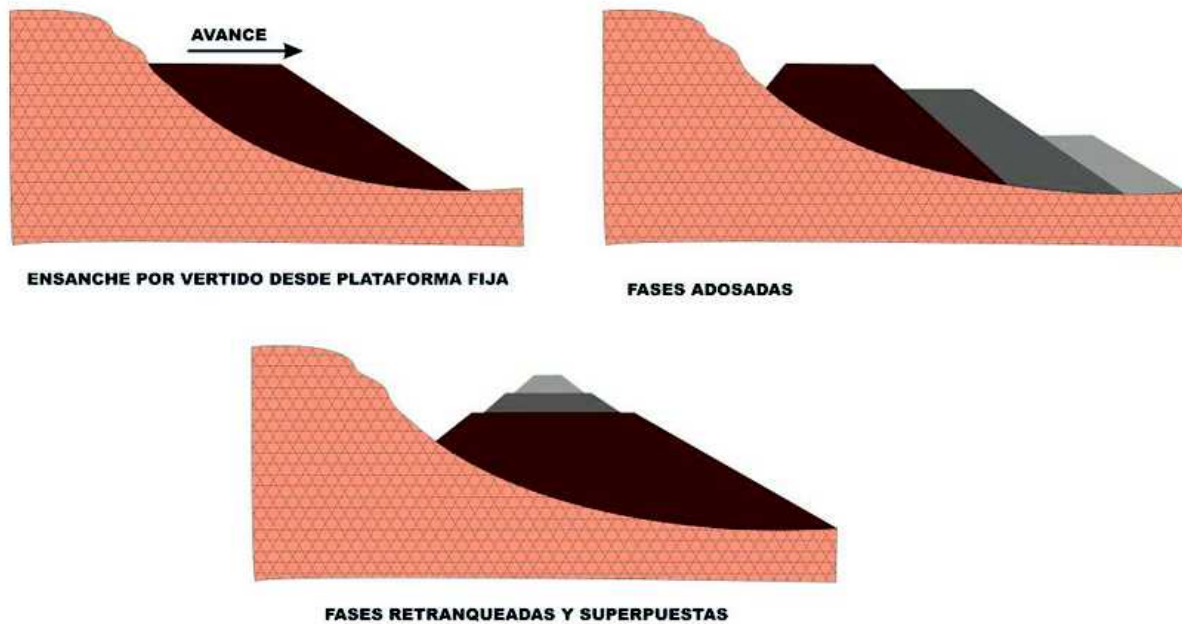
Hasta hace unos años, como sucede en la minería artesanal, la elección de una alternativa para situar la escombrera se basaba únicamente en el coste que suponía el vertido, pero actualmente en la minería sostenible tienen un peso mayor las consideraciones ambientales, pasando a estar en algunos casos por encima de las económicas.



*Figura 3.18 Tipología de las Escombreras según su Ubicación.*

El tamaño y la forma vienen determinados por el volumen de estéril que sea necesario retirar para llegar al punto donde se encuentra el mineral. Este volumen depende de la topografía del área y de la tectoestratigrafía del yacimiento, y está muy influenciado por el costo de extracción del estéril y el valor económico del mineral que se encuentra debajo. Sin embargo, es común desarrollar varias escombreras con la expansión de la mina. Obviamente, es importante ubicar las escombreras fuera de cualquier zona de expansión de la mina.





*Figura 3.19 Formación de Escombreras*

Para ubicar bien las escombreras es importante conocer como mínimo tres parámetros geotécnicos del suelo:

- la cohesión,
- el ángulo de rozamiento interno
- el peso específico aparente.

Con ellos se puede estimar si los materiales sobre los que se asentará la escombrera pueden soportar la sobrecarga que supone el peso de los estériles vertidos, o si por el contrario no poseen las características que puedan asegurar su estabilidad. En este caso, podrían inducir movimientos que generen una rotura de la escombrera.

En general el estéril es material rocoso, sin gran porcentaje de material fino, y es estable con ángulos de taludes entre 32° y 35°. En zonas áridas donde la influencia de humedad sobre la estabilidad es menor, se pueden encontrar ángulos hasta 38°. Sin embargo, siempre hay que considerar el efecto de los seismos en los países ubicados en la franja Pacífica de Sudamérica.

Una de las técnicas más usada para esta evaluación se basa en el análisis de decisiones por múltiples objetivos. Este método es de gran aplicación en la ingeniería y requiere el empleo y definición de funciones de utilidad multi-atributos para la valoración de los diferentes objetivos implicados en la toma de decisiones. Actualmente se usan diferentes tecnologías de SIG y SSD (ver apartado ) para la toma de este tipo de decisiones.

Para seleccionar el emplazamiento de escombreras hay que tomar en cuenta los factores que se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 3.11 Selección del Emplazamiento de Escombreras**

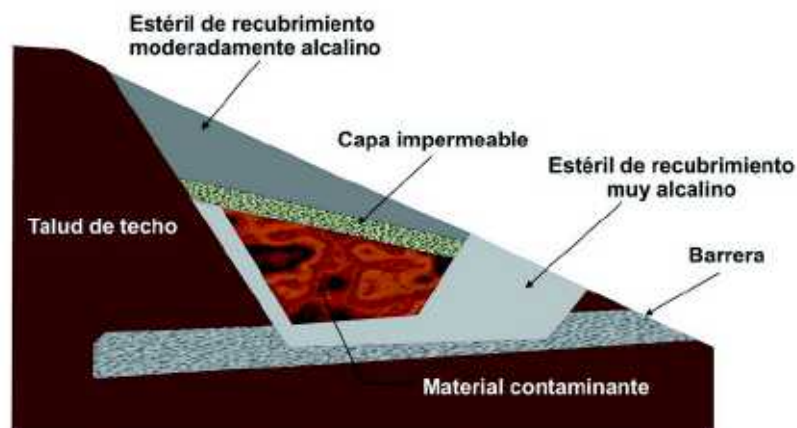
Factores para la selección del emplazamiento de escombreras
Minimizar el coste de transporte y vertido.
Alcanzar la integración y la restauración de la estructura en el entorno.
Garantizar el drenaje.
Minimizar el área afectada.
Evitar la alteración de hábitats y especies protegidas, etc.

El criterio más importante, después de los geotécnicos que confieren la estabilidad a la escombrera, es lograr un buen aislamiento físico-químico, que evite que los posibles contaminantes químicos por lixiviación y posterior transporte por infiltración o por escorrentía contaminen los suelos adyacentes y los recursos hídricos.

### **3.4.7.2 Mejores Técnicas Disponibles para el Manejo de Estériles**

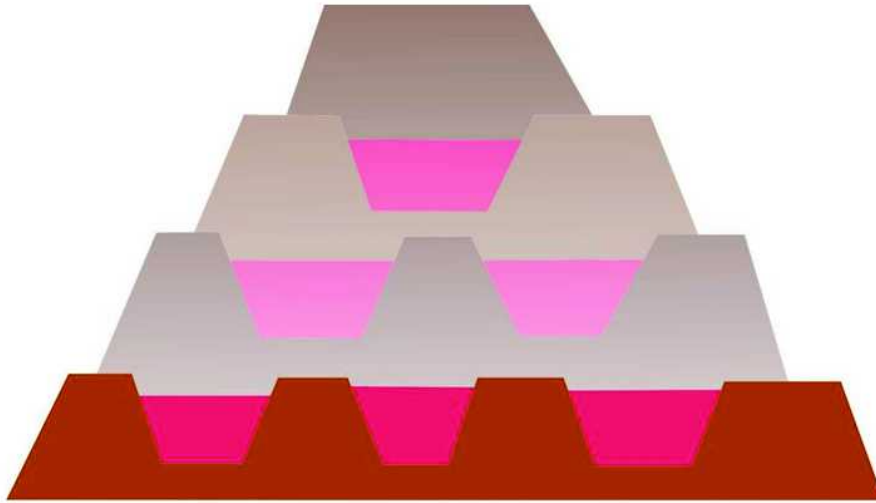
#### **Control de Generación de Aguas Ácidas en Escombreras por Encapsulación**

El vertido selectivo de los estériles de la mina es una forma segura de mantener los productos reactivos encapsulados; de esta forma se evita el contacto con el oxígeno y el agua evitando la formación de aguas ácidas. Para realizar este tipo de vertido es necesario haber realizado con anterioridad un estudio de generación de aguas ácidas para los materiales que conforman la estructura geológica de la mina. Mediante este estudio, ver apartado 3.4.5 de la guía, se pueden identificar los materiales generadores de DAM y por lo tanto los que deberán ser encapsulados. El método de vertido se describe brevemente a continuación.



**Figura 3.20 Vertido Selectivo de los Materiales. Basado en Ayala, 1996**

Esta técnica consiste básicamente en separar el material reactivo, o que pueda presentar un riesgo de generación de aguas ácidas, y disponerlo de una forma selectiva en el cuerpo de la escombrera, de tal forma que se evite el contacto con el oxígeno y el agua. Generalmente, y aunque es un método seguro, suele realizarse un sellado con materiales alcalinos para mayor seguridad. El proceso constructivo incluye la disposición de una barrera de protección en la base de la escombrera, mediante arcilla compactada o un geotextil, sobre el que se dispondrán las celdas de materiales no reactivos. En los huecos de estas celdas se realiza el vertido de los materiales reactivos y una vez rellenas, se procede a su sellado con un material impermeable, tal como arcilla.



*Figura 3.21 Esquema de una Escombrera con Disposición Selectiva de los Materiales.*

#### **3.4.7.3 Técnicas Emergentes para el Manejo de Estériles**

##### **La escombrera como acuífero**

El flujo de agua subterránea a través de escombreras y galerías de mina se comporta como un acuífero pseudokárstico, en contraste con el flujo a través de un medio poroso convencional, caracterizado por una circulación más lenta a través de los espacios intergranulares o fracturas de las rocas. El flujo de agua subterránea en un medio pseudokárstico se puede considerar caracterizado por múltiples caminos de flujo, altos valores de conductividad hidráulica y un alto grado de impredecibilidad.

En el caso de las cuencas pequeñas, los estériles de una escombrera que no generen DAM y que poseen las características de porosidad apropiadas y aquella parte del substrato constituida por los materiales sobre los que se apoya se pueden considerar como un ejemplo de un acuífero en el que la matriz está constituida por residuos mineros (Loredo et al., 2001). Por otra parte, el gran espesor que en algunos puntos llegan a alcanzar las escombreras con varias decenas de metros, y su extensión frente a la de una pequeña cuenca, hacen que pueda darse la posibilidad de que sea un acuífero relativamente importante, con gran capacidad de almacenamiento de agua, lo cual tiene relativa importancia en zonas semiáridas (Orche, 2003).

A escala de la cuenca, el funcionamiento hidráulico viene determinado por los niveles de alimen-

tación y de descarga del acuífero. La recarga fundamental procede de la infiltración del agua de lluvia así como de los aportes fluviales que saturan los materiales por los que circulan las aguas de escorrentía. Si se dan las condiciones correctas, es posible que una porción de la precipitación estacional, típica en zonas semiáridas, quede retenida dentro de la escombrera y represente una potencial fuente de recursos hídricos, durante los meses secos del año.

Por otro lado el sistema propuesto puede considerarse como una variante de los métodos tradicionales de recarga, dado que lo que se trata de generar es una presa de recarga pero que permite una reducción muy importante de la evaporación y un coste constructivo mucho menor; además se consigue reutilizar los materiales no generadores de DAM para un uso ambiental.

### **Co-Vertido de lodos espesados y estéril de mina**

Uno de los más recientes descubrimientos en la búsqueda de la mejor solución técnico-económica para el vertido de los residuos mineros es el denominado “Paste Rock”. Esta tecnología emergente trata de convertir el lodo espesado en una pasta y mezclarla con bloques de tamaño medio de estéril de mina, y se procede al rellenado de los huecos existentes entre los grandes bloques de las escombreras (Palkovits, 2007).

Con ello se obtiene un uso más eficiente del espacio, y se logra que los lodos estén en un punto inaccesible, de forma que se utiliza poca agua. En una operación a cielo abierto, puede ser posible y práctico verter todos los lodos en forma de pasta en los huecos de la escombrera de la mina, lo que lleva a que hacer una balsa tradicional sea innecesario (Longo y Wilson, 2007).



*Figura 3.22 Vertido de la Pasta*

Los estudios indican que éste puede no ser un método factible para la minería subterránea, en gran

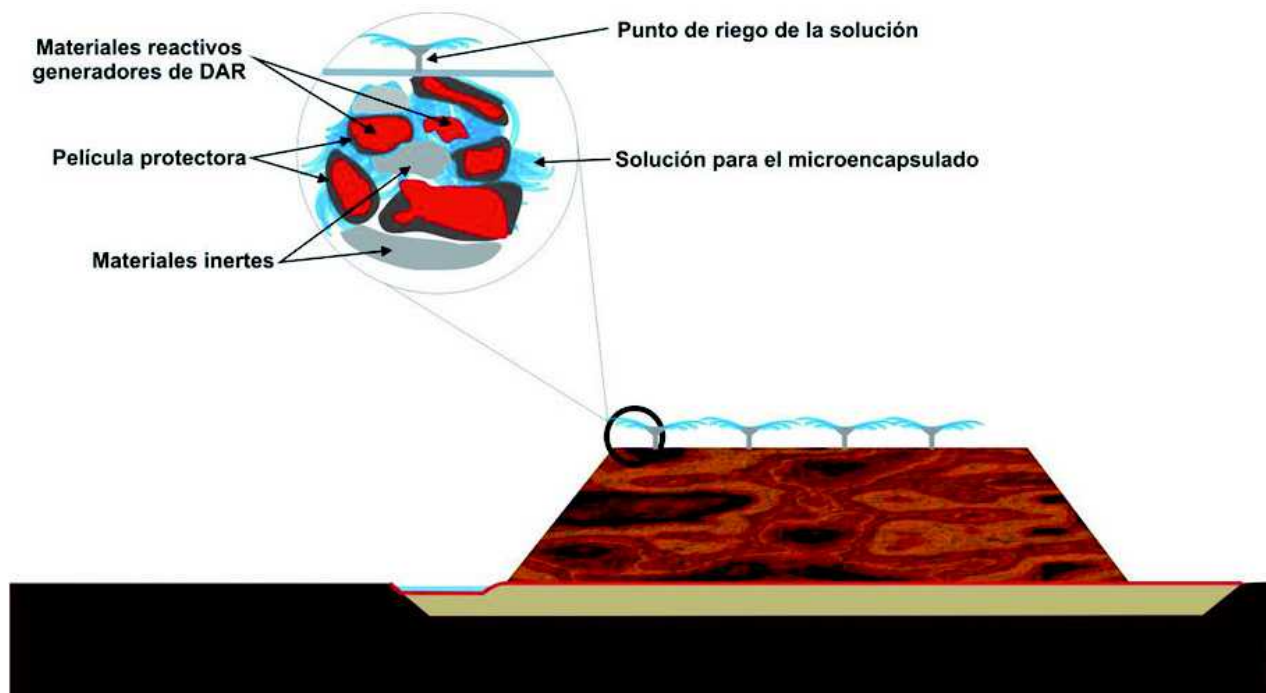
parte porque hay menos disponibilidad de estéril (Palkovits, 2007).

### **Microencapsulado**

Evangelou (1994; 1995; 1999) orientó sus investigaciones sobre técnicas para la reducción de la generación de DAM hacia una tecnología de aislamiento de materiales innovadora como es el microencapsulado de los mismos. Esta tecnología emergente se basa en lograr el encapsulamiento de cada grano o partícula generadora de DAM con una película o capa de un precipitado inerte y estable que frenen las reacciones químicas que generan el drenaje ácido de roca.

Para lograr el microencapsulado se realiza un riego o lixiviación (ver figura 3.23) de los materiales reactivos con una solución acuosa rica en  $\text{PO}_4^{2-}$  o  $\text{Ca}^{+2}$  (Evangelou, 1995), fosfosilicatos (Fytas y Bousquet, 2002; Fytas et al., 1999; Fytas y Evangelou, 1998), de hidróxido de hierro-sílice (Zhang y Evangelou, 1998), fosfolípidos (Kargbo et al., 2004), y el hierro-8 hidroxiquinoleína (Lan et al., 2002). Estos materiales han demostrado reducir las tasas de oxidación en el laboratorio pero requieren reactivos caros, siendo necesario además añadir por encima del estequiométrico.

Otra técnica alternativa (Evangelou, 1995) que a priori parece que ofrecerá buenos resultados, consiste en utilizar para el riego o lixiviación una solución de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y un producto que amortigüe el PH. El  $\text{H}_2\text{O}_2$  oxida rápidamente la pirita y hace que forme hidróxidos de hierro insolubles que forman una película que se adhiere a las partículas reactivas; La función del amortiguador del pH es mantener un pH en torno al intervalo 5 – 7 durante el tiempo que dure la reacción de microencapsulado.



*Figura 3.23 Esquema del Proceso de Microencapsulado de Materiales Reactivos.*

### 3.4.7.4 Efluentes de Proceso y Lodos de Flotación

El mineral bruto procedente de la mina necesita ser procesado para lograr un concentrado de un grado adecuado para el proceso metalúrgico. Durante este tratamiento mineralúrgico se producen diversas operaciones de trituración, clasificación, molienda, flotación y concentración. Muchas de ellas son en húmedo, por lo que es necesario un aporte de agua para el proceso. La demanda de agua para el proceso es variable dependiendo del metal y de la composición geoquímica de la roca. En la Tabla 3.12 se indica el consumo típico de agua para diferentes metales y procesos.

El proceso de molienda y flotación para producir un concentrado es específico a cada mina y mineral dentro del yacimiento mineralizado. Los procesos (p.ej. el tamaño de material molido) y los productos químicos usados en los procesos de flotación y concentración están desarrollados en los laboratorios metalúrgicos. Por un lado tenemos un rechazo grueso de material estéril de los procesos de preconcentración (el rango de tamaño es del orden de centímetros) y por otro un material más fino procedente de las fases de ciclonado y flotación por espumas (el rango de tamaño es de milímetros). Una vez extraído el metal por el proceso de flotación con espuma, el resto del material, conocido como lodos o relaves que posee una granulometría fina, son depositados en las balsas de lodos, según diversos modos de deposición y técnicas constructivas.

**Tabla 3.12 Necesidades de Agua Específicas para Obtener un Determinado Mineral (Norgate y Lovel, 2004)**

Metal	Proceso	Fase	Consumo de agua
Cobre	Vía seca y electroafinado	Mina y Planta mineralúrgica	0,37 m <sup>3</sup> /t mineral
		Metalurgia	7,8 m <sup>3</sup> /t Cu
		Refino	0,6 m <sup>3</sup> /t Cu
Cobre	Pilas de lixiviación ácidas y SX/EW	Mina y lixiviación	23,0 m <sup>3</sup> /t Cu
		SX/EW	6,4 m <sup>3</sup> /t Cu
Níquel	Hornos flash y refino Sheritt-Gordon	Mina y Planta mineralúrgica	0,93 m <sup>3</sup> /t mineral
		Metalurgia	0,81 m <sup>3</sup> /t concentrado
		Refino	7,16 m <sup>3</sup> /t blister
Níquel	Lixiviación ácida a presión y SX/EW	Todas las fases	3,4 m <sup>3</sup> /t mineral
Plomo	Vía Pirometalúrgica	Mina y Planta mineralúrgica	0,64 m <sup>3</sup> /t mineral
		Metalurgia	4,85 m <sup>3</sup> /t Pb
		Refino	0,47 m <sup>3</sup> /t Pb
Plomo	Proceso metalúrgico Imperial	Mina y Planta mineralúrgica	0,64 m <sup>3</sup> /t mineral
		Metalurgia	12,73 m <sup>3</sup> /t Pb
		Refino	0,47 m <sup>3</sup> /t Pb

Metal	Proceso	Fase	Consumo de agua
Zinc	Proceso Imperial	Mina y Planta mineralúrgica	0,64 m <sup>3</sup> /t mineral
		Metalurgia	12,73 m <sup>3</sup> /t Zn
		Refino	0,54 m <sup>3</sup> /t Zn
	Proceso electrolítico	Mina y Planta mineralúrgica	0,64 m <sup>3</sup> /t mineral
		Refino electrolítico	12,33 m <sup>3</sup> /t Zn
Aluminio	Bayer/Hall-Heroult	Mina	0,03 m <sup>3</sup> /t bauxita
		Alumina Bayer	2,9 m <sup>3</sup> /t alumina
		Hall-Heroult	1,5 m <sup>3</sup> /t Al
Titanio	Becher/Kroll	Mina y Planta mineralúrgica	5,16 m <sup>3</sup> /t ilmenita
		Proceso Becher	6,0 m <sup>3</sup> /t rutilo
		Proceso Kroll	40,0 m <sup>3</sup> /t Ti
Hierro	Horno alto y refino	Mina y Planta mineralúrgica	0,21 m <sup>3</sup> /t mineral
		Sinterizado	0,15 m <sup>3</sup> /t sinter
		BF yBOF	1,94 m <sup>3</sup> /t acero
	Horno de arco eléctrico	Fundición y refino	2,24 m <sup>3</sup> /t acero
Oro	CIL cianuración y EW/refinado	Todas las fases	0,74 m <sup>3</sup> /t mineral

Un aspecto diferencial entre una presa de tierra convencional de almacenamiento de agua y una balsa de lodos es que para esta última los materiales que almacena pueden ser usados para construir el propio dique de contención de la balsa. Desde el punto de vista económico es ventajoso, pero sólo debe hacerse si el material usado posee unas propiedades físicas-químicas y geotécnicas adecuadas.

La característica que define un lodo es el tamaño de las partículas sólidas, ya que en función de eso, pueden definirse los aprovechamientos del mismo. La granulometría depende del proceso mineralúrgico empleado para concentrar o extraer los minerales.

Por ejemplo, para minerales de oro en plantas de tratamiento convencionales, donde el grado de molienda necesario para su liberación suele ser alto, más del 90 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 0,1mm. En el otro extremo se encuentran algunas operaciones de mineral de cobre, e incluso oro, donde el metal se recupera por lixiviación en pilas, dejando los residuos con una granulometría gruesa semejante a una grava.

En la mayoría de los casos los lodos generados presentan tamaños de partículas finas en el rango de las arcillas y limos (Figura 3.24). Comúnmente, el transporte de los lodos se realiza de forma hidráulica con concentraciones de sólidos en el rango del 15 al 60 % en peso. La concentración de esas pulpas y el método de vertido afectan a la segregación y su sedimentación en las balsas. Con los métodos de descarga convencional las partículas de mayor tamaño o arenas se depositan rápidamente formando una playa junto al dique, si ahí se encuentran los puntos de descarga, y el resto de las partículas finas fluyen como lamas hacia el interior de la presa. En general, los residuos del tipo

arena constituyen un material de construcción resistente con unas buenas características de drenaje. Las lamas (partículas inferiores de 0,1mm) presentan permeabilidades muy bajas y pequeñas resistencias al corte que las hacen inservibles para la construcción de las presas.

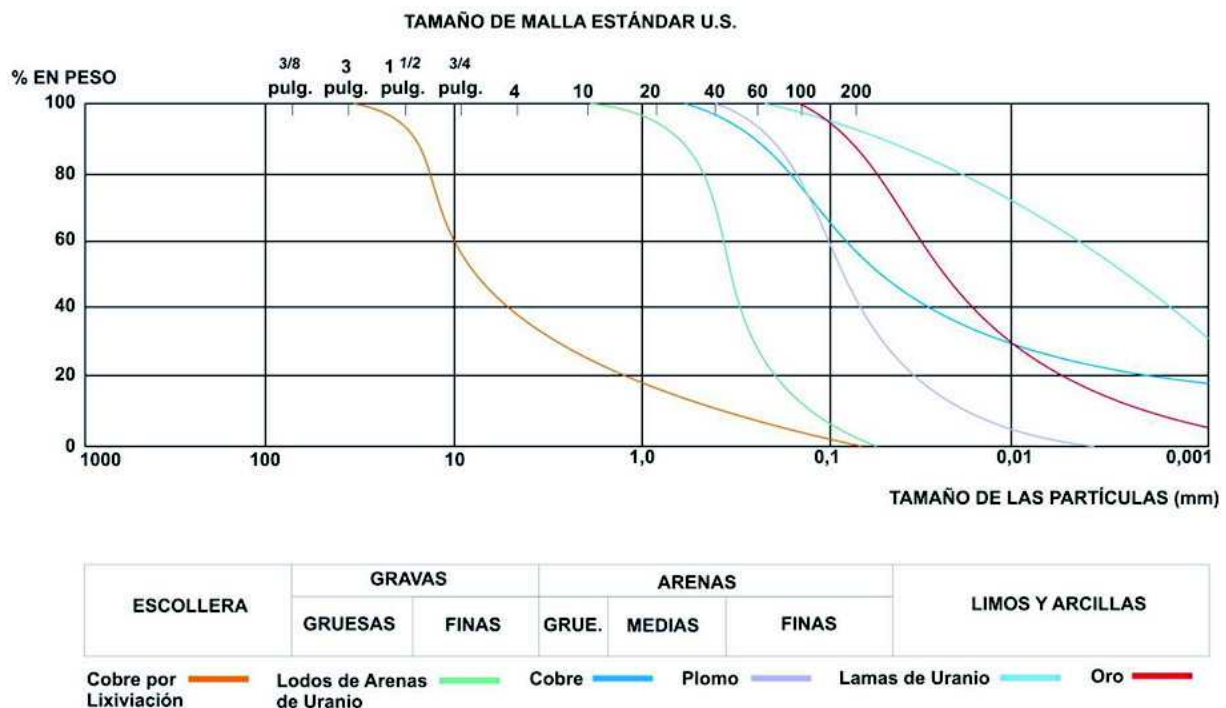


Figura 3.24 Curvas Granulométricas Tipo para Diferentes Metales Tratados (Ayala, 2004)

Un factor importante a tener en cuenta en el diseño de estas presas de residuos son las características químicas y la degradabilidad de los materiales que las forman. Puede darse el caso de que algunas fracciones gruesas puedan presentar inicialmente un buen comportamiento frente al drenaje y unas características geotécnicas adecuadas, pero si sufren una degradación rápida pasando a convertirse en un material de tipo arcilloso el comportamiento cambia drásticamente. Puede darse el caso contrario, que a pesar de la pequeña granulometría del material este sufra un proceso de cementación química y mejore su comportamiento geotécnico. Estas reacciones se producen entre los constituyentes de los lodos, o entre los lodos y el material del dique de la presa o de los suelos naturales y el aire, pudiendo afectar al diseño tanto en los aspectos físicos como ambientales. Estos fenómenos pueden ocurrir de forma inmediata o lentamente con el transcurrir del tiempo. En cualquier caso, estos cambios deben tenerse en cuenta, sobre todo para aquellos residuos que potencialmente son más tóxicos.

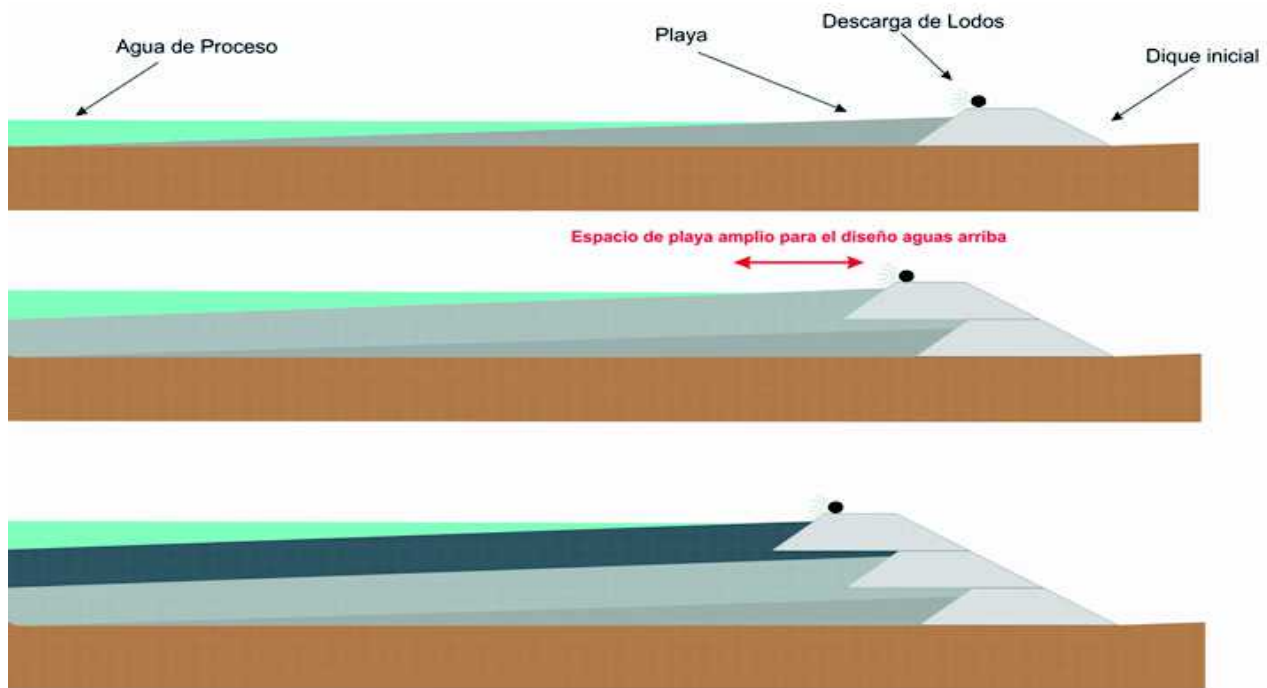
### 3.4.7.5 Vertido de Lodos del Proceso de Concentración

Tradicionalmente se han usado tres técnicas constructivas para la deposición de los lodos húmedos ciclados (contenido de humedad entre el 50-70 %). Estas son 1) por deposición Aguas Arriba; 2) por deposición en Línea Central y 3) por deposición Aguas Abajo.

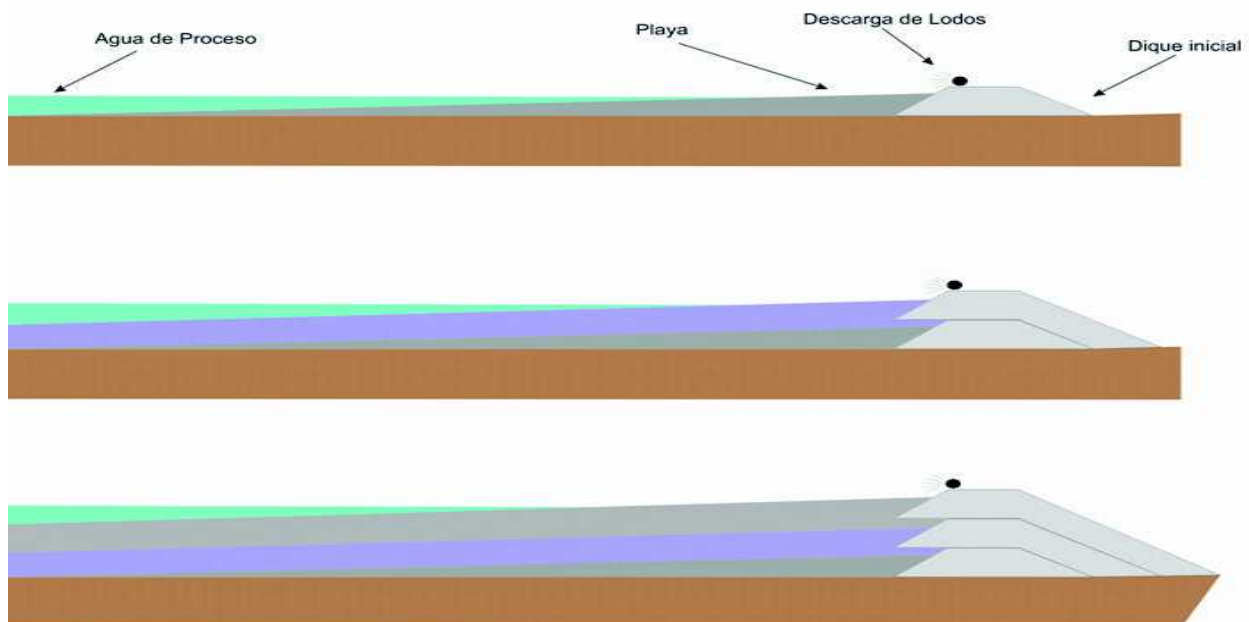
El proceso de ciclado produce la separación del material grueso (arena) y material fino (limo-



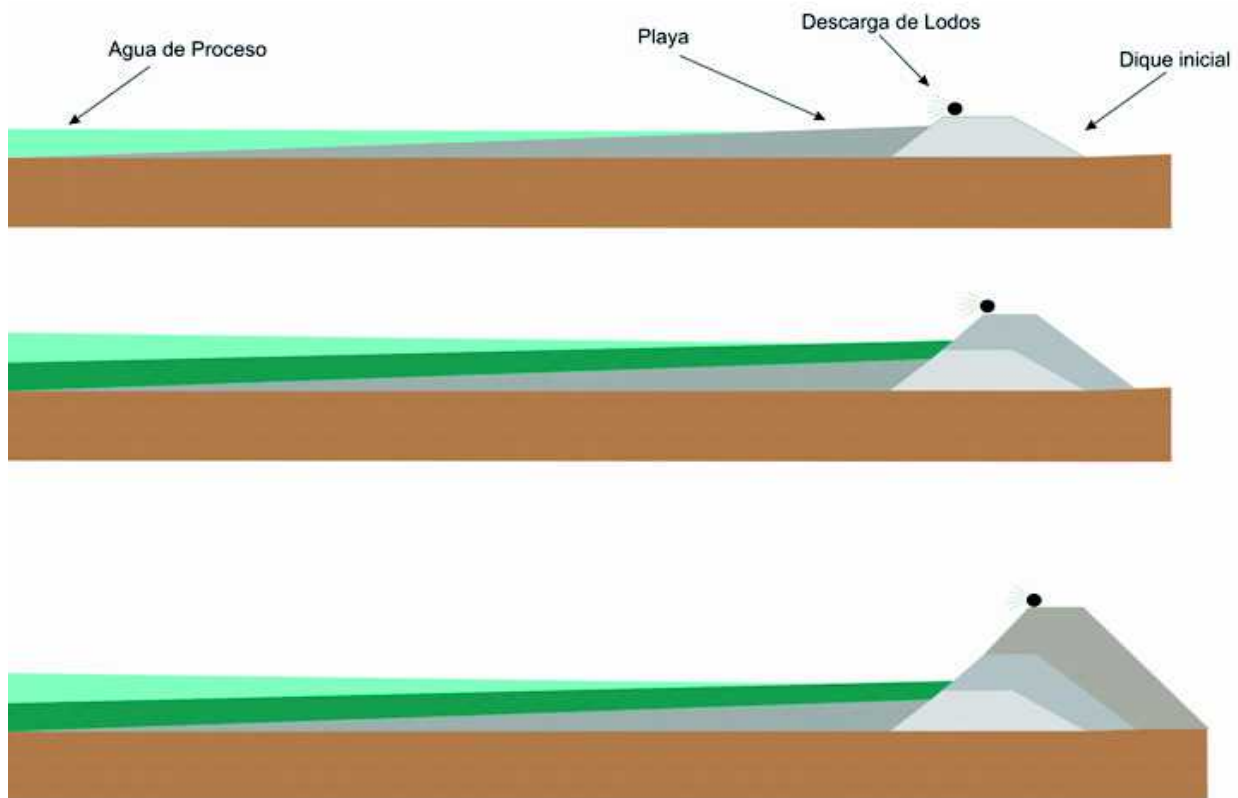
arcilla). Los lodos son depositados a través de una línea de ciclones. La arena se deposita a lo largo de la línea de ciclones mientras el material fino fluye y se deposita, formando una playa, aguas arriba de la línea de los ciclones, con la formación de una laguna de agua de proceso, una vez que se han asentado las partículas en suspensión. Las características de cada una de los sistemas de formación de las balsas se muestran en las siguientes figuras.



**Figura 3.25 Esquema de Construcción de una Balsa por el Método Aguas Arriba**  
 (nota: método prohibido en Chile, Perú y otros países por su inestabilidad inherente durante eventos sísmicos)



**Figura 3.26 Esquema de Construcción de una Balsa por el Método Aguas Abajo**



**Figura 3.27 Esquema de Construcción de una Balsa por el Método de Línea Central**

La ubicación de balsas formadas por el método de ciclones está restringida a valles naturales porque la presa crece con el vertido de los lodos. Muchas veces es necesario construir una presa de partida (starter dam) para contener los primeros depósitos de lodos. En proyectos grandes la presa de partida puede alcanzar una altura de 50-80 m sobre la base del valle. La gran desventaja de balsas formadas con lodos ciclizados es la ocupación de un valle con la consecuente necesidad de gestionar los flujos de agua en el valle, aunque sean esporádicos, y asegurar que el suministro de agua a los usuarios aguas abajo de la balsa no sea interrumpido.

**Tabla 3.13 Ventajas y Desventajas de los Métodos de Construcción de Balsas de Lodos**

Opción constructiva	Características de los lodos	Capacidad de almacenamiento de agua	Ventajas	Desventajas
Aguas Arriba	Como mínimo del 40 al 60 % de sólidos. Baja densidad de la pulpa para favorecer la segregación de las partículas	Mala	Bajo volumen de terraplén Bajo costo Alta razón de eficiencia Baja ocupación de terrenos.	Inestable bajo condiciones sísmicas. No permitido en países como Chile y Perú

Opción constructiva	Características de los lodos	Capacidad de almacenamiento de agua	Ventajas	Desventajas
Línea Central	Arenas o limos de baja plasticidad.	No recomendado para el almacenamiento permanente. Aceptable para inundaciones temporales con un diseño adecuado.	Adecuado para la construcción en zonas sísmicas Poca ocupación de terreno. Buena recuperación de las aguas.	No es recomendable para almacenamiento permanente de agua. Problemas de construcción en altura.
Aguas Abajo	Adecuado a cualquier tipo de lodo.	Buena	Sin restricciones de tasa de aumento Adecuado para la construcción en zonas sísmicas Adecuada estructura de retención de agua con forro Con buena recuperación de las aguas.	Coste de construcción alto.

### **Presa de Escollera**

La alternativa a una presa formada a partir de lodos ciclados es construir el dique de retención de la balsa de lodos a partir de bloques de escollera y otros materiales. Este sistema de construcción es el tradicional para las presas de tierra que configuran muchos embalses de agua. Tiene la ventaja de ser una presa de diseño de ingeniería y construcción controlada. Sin embargo, dependiendo de su tamaño y la disponibilidad de material para su construcción, el coste puede ser mayor que en los casos anteriores.

### **Ubicación**

En cuanto a la ubicación se dan tres tipologías, la de valle, la de ladera y la exenta o de añillo que es típica de zonas llanas (Figura 3.28).

En la Figura 3.29 se muestra el Balance de Agua típico de una balsa de lodos. Este balance es muy importante para calcular el uso de agua y la cantidad de agua disponible para reutilización en la planta de concentración. También es necesario para el diseño de la presa y el volumen probable de una crecida que hay que almacenar.

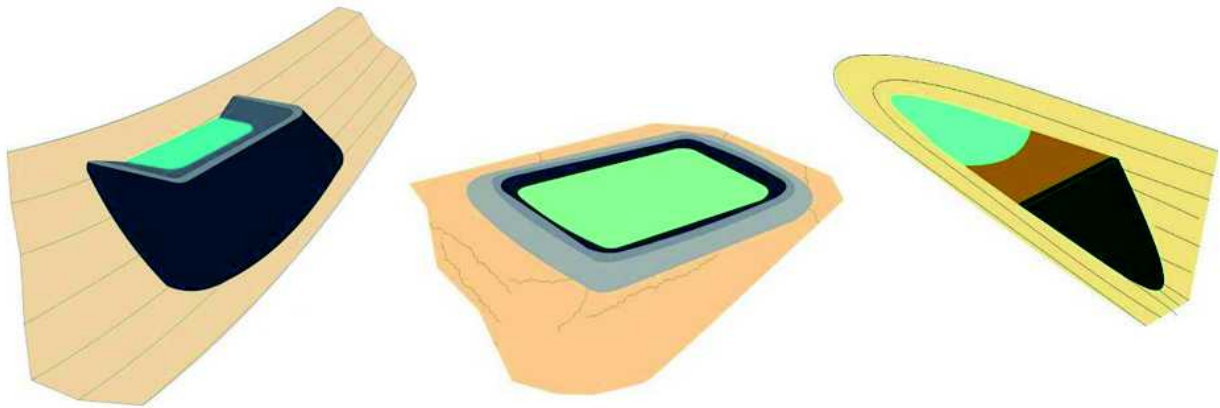


Figura 3.28 Tipología de las Balsas de Lodos (TAILSAFE, 2007)

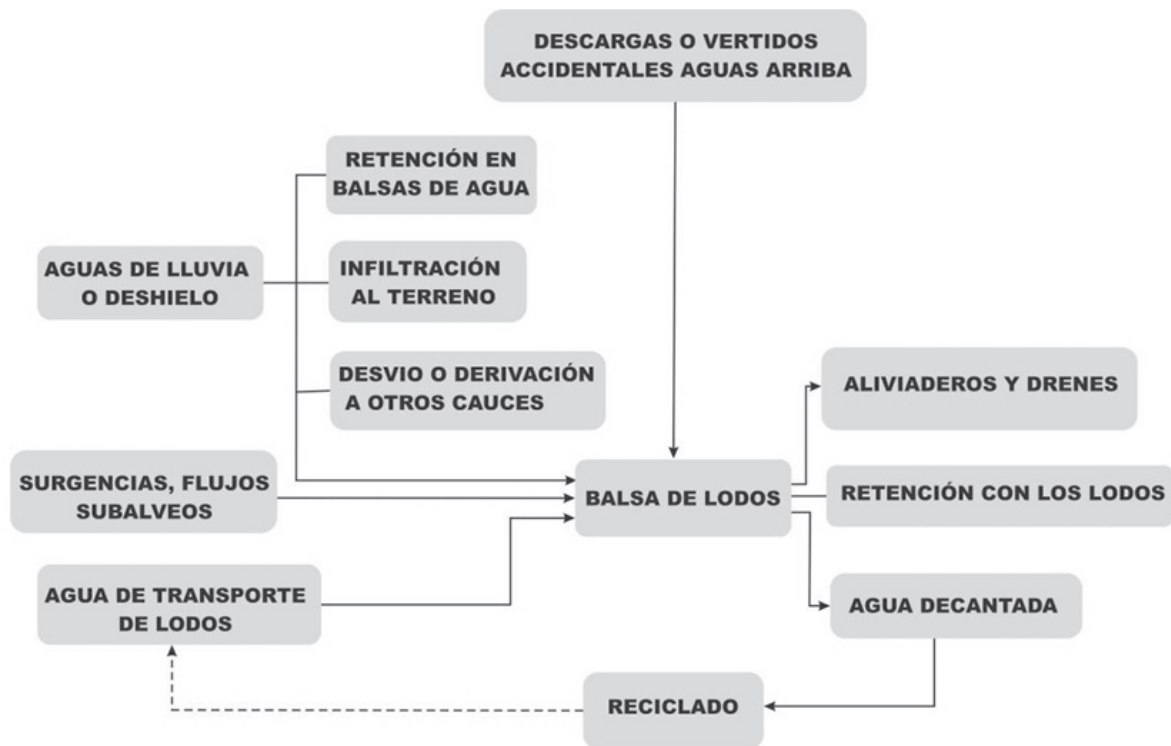


Figura 3.29 Procedencia y Flujo del Agua en las Balsas de Lodos

### 3.4.7.6 Elección del Emplazamiento de Balsas de Lodos

En el pasado, al igual que sucede hoy en las labores informales, las balsas de lodos se construían en áreas que se seleccionaban siguiendo únicamente dos criterios: condiciones topográficas favorables y proximidad a la planta de tratamiento, pero en la minería de hoy en día para satisfacer los requerimientos ambientales y de seguridad se valoran otros factores tales como la geología, el clima, la hidrología superficial y la disponibilidad de terrenos.

**Tabla 3.14 Factores que Influyen en la Ubicación y Diseño de las Balsas**

Factores Locales	Características de los Lodos	Características de los efluentes	Limitaciones ambientales
Geología	Producción de residuos	pH	Calidad del aire
Sismicidad	Granulometría	Cationes metálicos	Calidad de las aguas superficiales y subterráneas
Topografía (que determina la capacidad)	Contenido en arcilla	Potencial de Oxidación/Reducción	Requerimientos de restauración
Redes de drenaje	Composición química	Producción de Efluentes	Drenaje del agua superficial
Condiciones de los acuíferos	Método de vertido	Necesidades de Evaporación	
Régimen pluviométrico	Densidad de los lodos		
Evaporación	Potencial de Lixiviación		
Disponibilidad de terrenos			
Precio de los terrenos			

### **3.4.7.7 Mejores Técnicas Disponibles para el Vertido de Lodos**

Durante las últimas décadas se han desarrollado otros métodos de almacenamiento de residuos entre los se deben destacar el método de descarga espesada y el método de deposición en huecos mineros y cavidades.

#### **Método de descarga de lodos espesados y pasta**

Consiste en espesar los lodos hasta que alcancen una elevada viscosidad, con una concentración de sólidos entre el 55 y el 65 %. Los lodos espesados o la pasta pueden ser depositados en un solo punto o línea de puntos, de manera que los residuos formen un depósito en forma de cono con unos taludes cuyas pendientes oscilan entre el 2 y el 8 % (dependiendo de la viscosidad y granulometría

de las partículas). Los residuos son depositados como una mezcla homogénea de arenas y lamas.



*Figura 3.30 Vertido de Lodos Espesados; la Torre que se Apprecia al Fondo es el Punto de Vertido.*

Las ventajas de producir lodos espesados o en forma de pasta son:

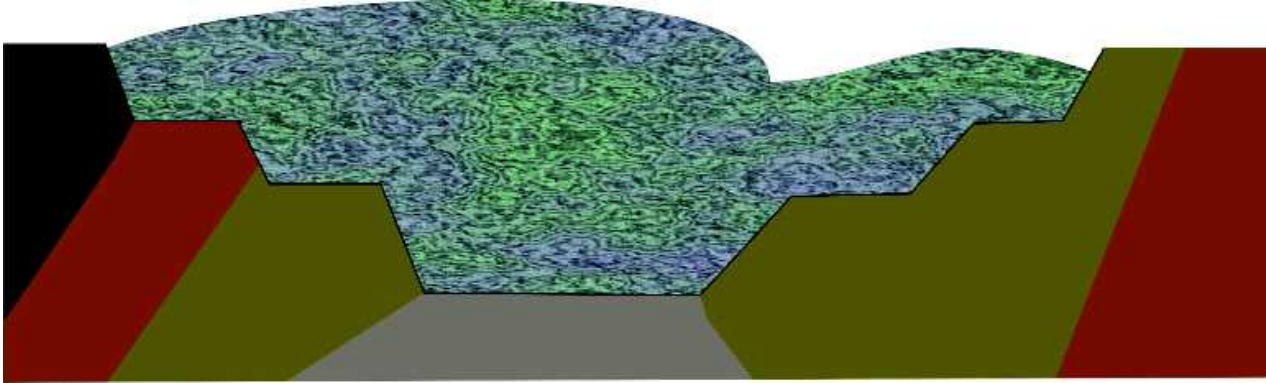
- Mayor recuperación de agua, reduciendo así la demanda global de agua de la mina.
- Una reducción en el área requerida para el depósito, porque los relaves están depositados en forma de pila.
- Mayor estabilidad y menor riesgo de licuefacción en zonas sísmicas.
- Reducción de la erosión eólica al incidir sobre las superficies expuestas, ya que los taludes permanecen permanentemente húmedos, y proporciona formas de las estructuras que son más fáciles de integrar en el paisaje.

Por el otro lado, presenta una serie de inconvenientes como pueden ser que aunque se eliminan los costes de construcción de los diques, se genera un sobrecoste como consecuencia del espesado y bombeo necesario para el vertido. También es necesario instalar sistemas de captación y sedimentación de las aguas de escorrentía en la superficie del depósito.

En general son considerados como métodos aplicables a operaciones mineras de tamaño mediano (hasta 100.000 toneladas/día), ubicadas en zonas ambientalmente sensibles o donde faltan sitios adecuados para la instalación de balsas convencionales.

### Método de deposición en huecos mineros y cavidades

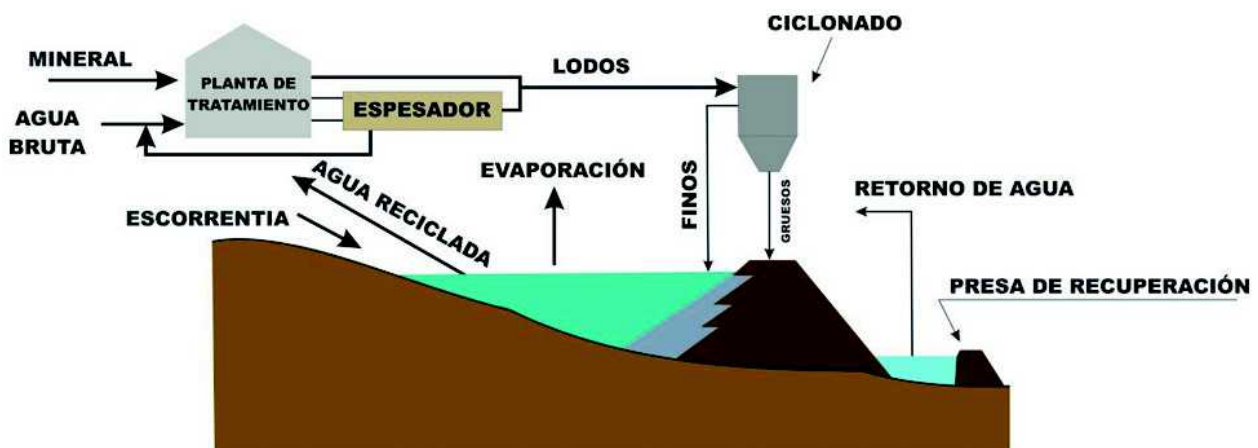
En las regiones con una actividad minera importante se ha pasado a considerar los huecos de explotaciones antiguas ya clausuradas como zonas preferentes para realizar los vertidos de los lodos. Estos huecos pueden ser minas subterráneas efectuadas en las proximidades de los yacimientos en explotación, como los de las minas a cielo abierto ya abandonadas (Ayala, 1986).



*Figura 3.31 Relleno de Corta*

### Reciclaje de agua

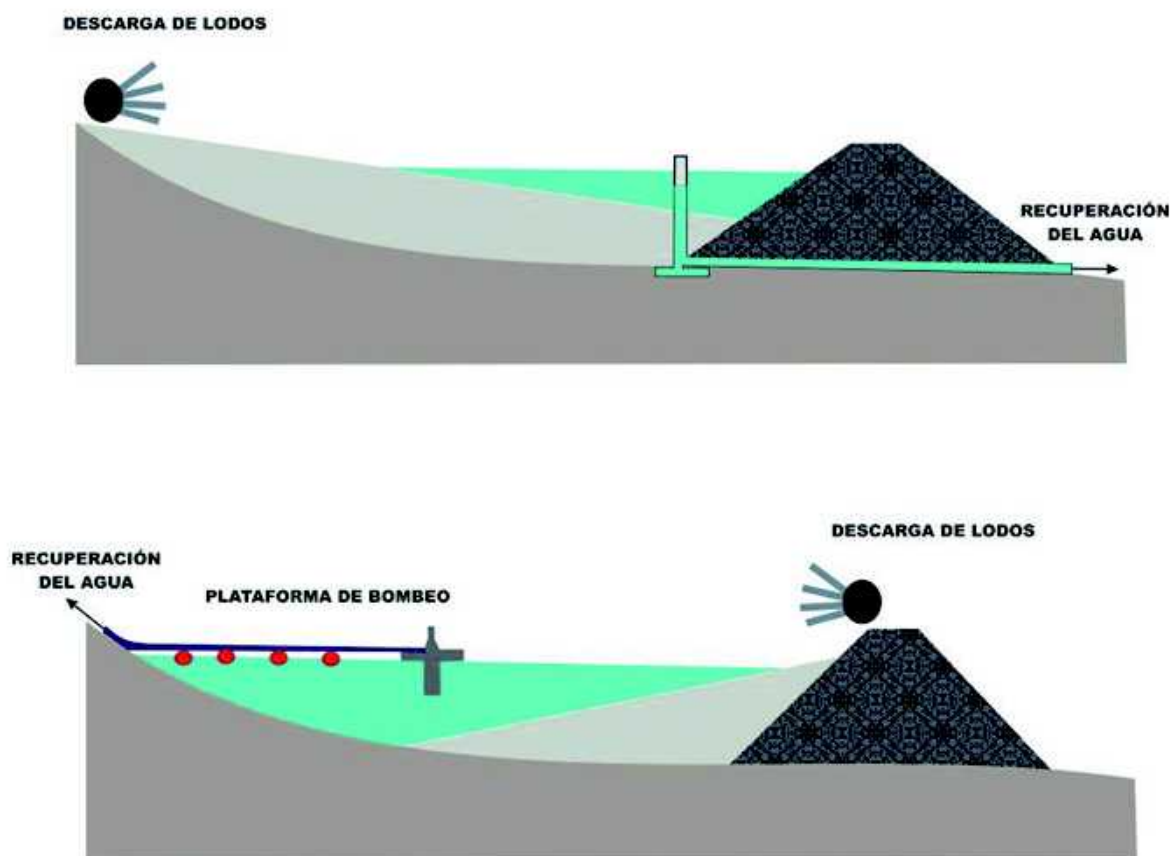
Los objetivos principales para reciclar el agua durante el proceso de concentración son por una parte reducir la demanda de agua bruta, y por otra reducir el volumen de efluentes generados durante el proceso. Esto forma parte del concepto de Descarga Cero. La reutilización del agua no es un nuevo concepto, se ha estado usando en múltiples plantas de concentración de minerales a nivel internacional durante muchos años (Wills, 2002). Esta metodología de gestión se está convirtiendo en un importante medio de minimizar el consumo de agua, especialmente en zonas con escasez de recursos. Además se colabora a minimizar el volumen de las aguas contaminadas que pueden requerir tratamiento previo antes de ser vertidas a arroyos o ser dedicadas para otros usos.



*Figura 3.32 Ciclo del Agua en una Planta de Tratamiento de Minerales (modificado de Ayala, 2004).*

El efecto que esta agua reciclada ejerce sobre el rendimiento de la planta está siendo estudiado muy de cerca por diversos autores y empresas mineras, dado que el beneficio obtenido al final del proceso depende especialmente del rendimiento de ésta. Normalmente, es necesario un tratamiento antes de volver a usarla para reducir la acidez o eliminar algunos metales, sales disueltas o sólidos en suspensión, incluso materiales biológicos y microorganismos en aquellos procesos que los usen.

Los métodos clásicos de toma de agua en la zona del lago minero en las balsas de lodos se muestran en la siguiente Figura.



*Figura 3.33 Modos de Recuperación del Agua de las Balsas de Lodos. Punto central (arriba), Plataforma móvil (abajo). (modificado de Ayala, 2004)*

### Reducción de la erosión eólica

En las balsas de lodos que presenten una sobreelevación por encima de los contornos de los alrededores de forma artificial (como sucede en la mayoría de los casos), las crestas o colinas generadas están expuestas a la erosión por parte del aire o del agua. La erosión eólica es una de las principales causas de la pérdida y dispersión de materiales procedentes de las balsas en el entorno de la mina. Esta dispersión de polvo puede ser un grave problema, así como un peligro para la salud de los habitantes que residan en las cercanías del emplazamiento minero. También puede dañar la salud de los animales, producir la degradación de los cultivos, y causar la contaminación del suelo y el agua.



El problema de la erosión eólica puede afectar a las balsas en todos los tipos de clima, pero tiene unas consecuencias más marcadas en las regiones áridas (Blight, 2007).



*Figura 3.34 Viento Levantando Polvo en una Balsa de Lodos*

En las zonas áridas, donde la vegetación es escasa, la erosión eólica es importante, debido a la falta de cohesión de las partículas del suelo. Durante la planificación de una mina es importante tener una medición continua de la dirección y velocidad del viento, para saber las variaciones diurnas y estacionales, además de la medición de la calidad del aire (medición de partículas de  $10\mu\text{m}$  - PM10 y/o  $2.5\mu\text{m}$  - PM2.5 dependiendo de la normativa vigente) en los puntos considerados como receptores. Uno de los puntos claves como potencial receptor sería el sitio para el campamento de la mina u otra instalación sensible.

El uso de modelos tales como AERMOD , CALPUFF u otros modelos para pronosticar la calidad del aire forma parte de los estudios ambientales de línea base y de la definición de medidas de mitigación durante la operación de la mina.

La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) (Morgan, 2005) se ha utilizado durante muchos años para predecir las pérdidas debidas a la erosión en los campos agrícolas. En ella se identifican como parámetros más importantes en la erosión eólica la longitud y el ángulo de la pendiente. Estos parámetros, junto con la fuerza de cizalla o la rugosidad hidráulica, se han confirmado como los parámetros fundamentales de la erosión de las balsas de lodos en Sudáfrica (Blight, 1989, 1991; Blight, y Amponsah-da Costa, 2004). Los trabajos sobre la erosión eólica de los taludes de balsas de lodos en Sudáfrica indican lo siguiente:

- La máxima erosión se produce cuando el rango de las pendientes del talud son de 30-

- 35°, valores muy comunes en este tipo de taludes.
- Se produce muy poca erosión en los taludes escarpados, especialmente cuando se acercan a la vertical.
- Se produce muy poca erosión en las zonas que tienen un ángulo cercano a la horizontal.
- Los taludes sobre los que se asienta vegetación herbácea, se erosionan menos que las laderas sin protección.

Un estudio reciente de Canada indica que taludes cóncavos, que se asemejan a los taludes formados en paisajes naturales, pueden reducir la erosión a largo plazo en un factor 2 o 3. Si este diseño se planifica desde un principio, los costes de construcción son solo marginalmente mayores que aquellos de taludes lineales. En trabajos de rehabilitación los costes de remodelación son algo mayores, pero se compensan a largo plazo por la reducción de trabajos de mantenimiento. (Priyashantha et al., 2009)

#### ***3.4.7.8 Técnicas Emergentes para la Gestión de Efluentes de Proceso***

##### **Procesado en Seco**

Napier-Munn y Morrison (2003) examinaron las oportunidades de procesar los minerales en seco en sustitución de los procesos convencionales. Encontraron varios puntos en que nuevas tecnologías deben ser desarrolladas, incluyendo:

- Las líneas de flujo de materiales deben poner un gran énfasis en lograr una liberación de mineral mucho mayor, para eliminar la mayor parte de ganga en los gruesos de las primeras líneas por métodos convencionales.
- Es necesario una mayor investigación para aumentar el rendimiento de los actuales procesos por vía seca y desarrollar nuevos métodos de separación en seco, usando propiedades de los minerales que actualmente no se tienen en cuenta.

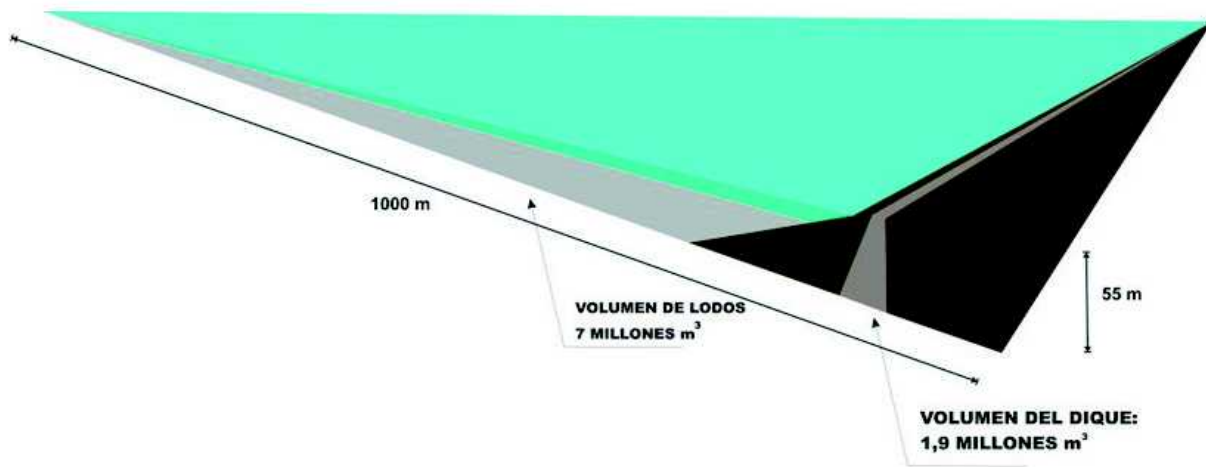
El procesado en seco ha sido aplicado a una infinidad de minerales incluyendo el yeso, sal, fosfatos, talco, magnesita, diamantes, caliza, potasio, oro, carbón, uranio y minerales de cobre-cinc-plomo (Brown, 2003). En los últimos años, en CSIRO Minerals, se está investigando la separación de partículas en seco. Esta investigación se ha centrado en el uso de un separador vibratorio que clasifica las partículas en función de su tamaño y densidad (O'Connor et al., 2002).

##### **Vertido de lodos en pasta y torta.**

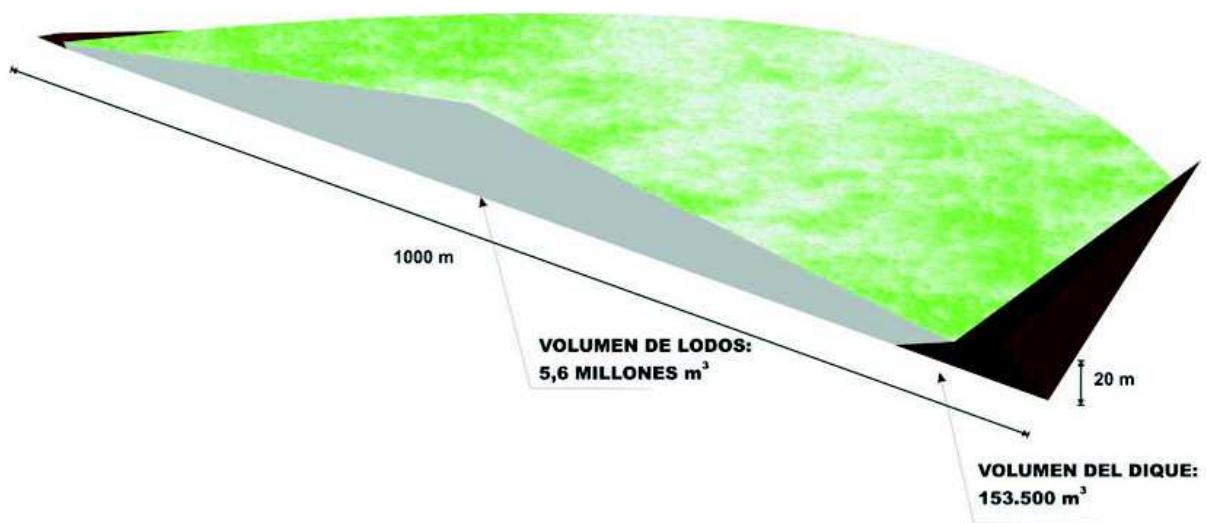
Para entender las tendencias en la tecnología del vertido de lodos en modo pasta, es importante comprender su naturaleza. Mientras que en el método convencional de vertido de lodos el contenido de sólidos en suspensión oscila entre 30 y 50 %, en el caso de las pastas este contenido puede oscilar entre 65 y 80 %. El espesamiento de los lodos en un 30 a 75 % logra una reducción de la cantidad de agua en balsas de lodos de cerca del 85 %. Esto significa que por su consistencia la pasta en general, no puede ser bombeada con una bomba centrífuga, sino más bien con una bomba de pistón, y el material fluye a través de un conducto hasta el punto de vertido.

En las figuras siguientes se muestran dos balsas, una tradicional y otra con un sistema de vertido

de tipo pasta. Los números muestran como para un almacenamiento muy similar, 7 millones de  $m^3$  frente a 5,6 millones de  $m^3$ . El vertido de pasta alcanza sólo 20 m de altura en la coronación, mientras el dique de la balsa tradicional alcanza la nada despreciable altura de 55 m.

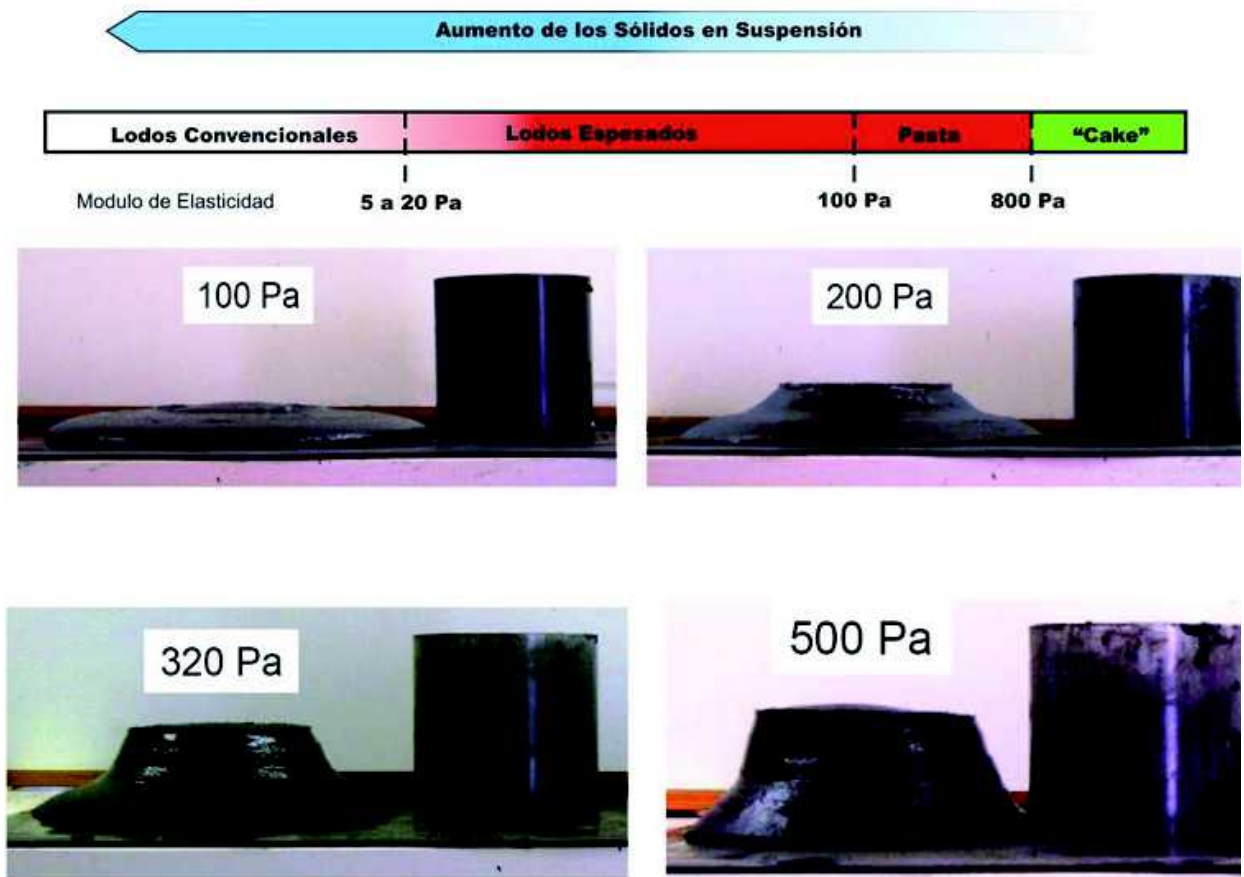


*Figura 3.35 Esquema de una sección de una balsa convencional.*



*Figura 3.36 Esquema de una sección de una balsa con vertido tipo pasta.*

Para comprender como se logra esta reducción de altura basta con fijarse detenidamente en la figura siguiente, donde se muestra como con un aumento del espesamiento, al realizar el ensayo de “vertido en cono”, con menores cantidades de agua en los lodos se logra una reducción del espacio necesario para realizar el vertido de la misma cantidad de lodo. Con ello se logra minimizar la huella ecológica de la balsa, menor impacto visual, mayor recuperación de agua, mejores características geotécnicas del lodo.



*Figura 3.37 Tipos de Lodos en Función de su Contenido en Sólidos. Modificado de Cooke, 2008.*



*Figura 3.38 Vertido en Forma de Pasta mediante Cinta Transportadora.*

### 3.4.8 Gestión de Soluciones Cianuradas en Operaciones Mineras

El término “cianuro” sirve para designar a una familia de compuestos químicos inorgánicos que se caracterizan por la presencia de un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple. Los compuestos orgánicos que contienen este grupo se denominan “nitrilos”. Generalmente, este término tiene connotaciones negativas debido a que muchos de sus compuestos presentan propiedades sumamente tóxicas. La minería es una actividad industrial que utiliza actualmente una cantidad significativa de cianuro, aproximadamente un 20% de la producción total mundial. (Álvarez, 2005).

La solución residual de los procesos de cianuración empleados en la minería de oro, aún después de haber sido sometida a un proceso de detoxificación suele tener niveles importantes de  $CN^-$ . Siempre es obligatorio almacenar las soluciones cianuradas en lagunas o piscinas revestidas. En la práctica es muy difícil reducir las concentraciones de  $CN^-$  por debajo los 0.2 mg/l, la concentración normalmente aceptada para la descarga de agua al medio ambiente. Una vez que la planta de cianuración haya dejado de funcionar, en la balsa de estériles habrá un volumen muy importante de solución con concentraciones notables tanto de compuestos cianurados como de metales y otros iones (amonio, sulfato, nitrito, nitrato, etc) que la convierten en un residuo peligroso y delicado de gestionar. Los costos asociados a los tratamientos activos convencionales resultan a menudo difíciles de asumir, sobre todo una vez que ha cesado la producción.

Otra alternativa para eliminar las soluciones con  $CN^-$  es la evaporación y la deposición de residuos sólidos en un vertedero autorizado. En zonas secas y áridas con alta tasa de evaporación el proceso puede ser rápido. En sectores donde la evaporación es menor por la altura de la mina, las temperaturas bajas limitan la evaporación, es posible crear una neblina bombeando la solución por boquillas con apertura fina, que acelera la evaporación. Sin embargo hay que diseñar estas instalaciones con mucho cuidado para evitar que la neblina de  $CN^-$  pueda afectar al medio ambiente o a la población.

### 3.4.9 Emisiones al Aire

La contaminación atmosférica está originada fundamentalmente por partículas sólidas, polvos y gases derivados de la apertura de huecos mineros, voladuras, creación de escombreras y del tráfico de los volquetes y la maquinaria pesada, que son los que generan los impactos más severos.

En menor grado las emisiones a la atmósfera proceden de la construcción de los viales mineros que generan un impacto más moderado. En todos estos casos los efectos son temporales, asociados al periodo funcional de la construcción y de explotación. Otras emisiones de polvo proceden de las escombreras y las balsas de lodos, a causa del efecto del viento sobre los materiales finos depositados en estos acopios de material. En el caso de las balsas de lodos, debido a las altas temperaturas y la escasez de humedad en el ambiente, los taludes de la balsa pierden humedad rápidamente y si no se cubren adecuadamente se produce la acción erosiva del viento. Después del cierre de las operaciones productivas y el fin de la deposición de relaves, las aguas claras se evaporan dejando una superficie seca con alto potencial de levantamiento de polvo por los vientos convectivos durante los días calurosos.

**Tabla 3.15 Principales Recomendaciones para Minimizar la Contaminación del Aire**

Principales recomendaciones para minimizar la contaminación del aire	
Riego periódico de las pistas y accesos de las minas.	Mejora de los métodos de manipulación de los materiales.
Estabilización química de los materiales de construcción de las pistas.	Empleo de pantallas, vegetales o de otro tipo, frente al viento.
Pavimentación de los accesos permanentes a las explotaciones.	Control del polvo durante la perforación por medio de captadores.
Retirada de las pistas del material formado por acumulación del polvo.	Reducción del número de tajos con voladuras.
Reducción de la velocidad de circulación de vehículos.	Sustitución de los volquetes por cintas transportadoras.
Revegetación de áreas adyacentes a las pistas de transporte.	Disminución de la producción durante los vendavales.
Limitación de los cruces de pistas.	Extinción de los puntos de combustión espontánea del carbón.
Control del polvo procedente de la carga de los volquetes.	Reducción del tiempo entre las fases de explotación y restauración.
Reducción de las áreas de excavación expuestas a la acción del viento.	Control del polvo durante el transporte del mineral desde la planta de tratamiento.
Rápida revegetación de los terrenos restituidos.	Instalación de cubiertas de material granular.

#### **3.4.9.1 Mejores Técnicas Disponibles para la Gestión de Emisiones al Aire**

Los métodos de control para las pistas mineras más utilizados, dado que para las balsas de lodos ya se han mencionado, son los siguientes:

##### **Riego con agua**

Es un método bastante económico y efectivo. La eficacia de control se cuantifica en el 84 % y 56 % para las partículas totales e inhalables respectivamente. El principal inconveniente es la frecuencia de aplicación, sobre todo en las regiones áridas, donde presenta un grave inconveniente.

##### **Estabilizantes químicos**

Se emplean tres tipos de sustancias químicas: agentes humidificadores, sales higroscópicas y agentes creadores de costra superficial. Cada uno de ellos ejerce el control del polvo en base a principios diferentes. Los agentes humidificadores reducen la tensión superficial del agua humedeciendo el polvo más fino, que es el de más difícil control. Las sales higroscópicas captan el vapor del agua atmosférico, retrasando la evaporación de sus soluciones y elevando la humedad de la capa superficial. Este aumento de humedad incrementa la compactación y la cohesión, resultando una reducción importante del polvo. Las sales que más se utilizan son el cloruro sódico y el cloruro cálcico. Este último se aplica bien en estado sólido en forma de laminillas o en forma de solución concentrada o salmuera.

### 3.4.10 Sistemas de Cubierta

La instalación de sistemas de cubierta, cobertura o recubrimiento es uno de los métodos más comunes para controlar la infiltración en escombreras, balsas de lodos y pilas de lixiviación. Tradicionalmente se lleva a cabo en la fase de cierre de una mina, pero como se ha mencionado anteriormente la mejor práctica consiste en empezar las tareas de restauración durante la fase de explotación cuando hay flujo de caja para sufragar las obras.

En general los sistemas de cubiertas se usan para lograr algunos de los objetivos siguientes, o todos ellos, en función de las circunstancias específicas del emplazamiento:

- Limitar la infiltración de agua
- Limitar la difusión de oxígeno
- Mejorar la resistencia a la erosión a largo plazo
- La contención de las cubiertas de material dentro de la estructura
- Mantenimiento de comunidades de vegetación

Prevención de efluentes provenientes de los productos de oxidación Para alcanzar estos objetivos se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Condiciones climáticas
- Condiciones hidrogeológicas
- La aceptación por parte de la comunidad del impacto producido en el medio receptor
- Tipo y diseño del sistema, selección de la cubierta
- Propiedades físicas y geoquímicas de los materiales que deban cubrirse
- Propiedades físicas y geoquímicas los materiales disponibles para realizar la cubierta
- Colonización por la fauna y la flora

A pesar de ser una estrategia que se lleva utilizando durante muchos años por la industria minera en todo el mundo, ha habido un historial de éxitos y fracasos. Por lo tanto, antes de embarcarse en el diseño de un sistema de recubrimiento para un vertedero deben de plantearse una serie de preguntas. Las preguntas clave cuando se diseña un sistema de este tipo son:

**Tabla 3.16 Recubrimiento de Escombreras de Estériles y Balsas de Lodos**

Preguntas Clave para la Construcción de Cubiertas
¿Por qué vamos a cubrir los residuos?
¿Cómo vamos a realizar la cobertura?
¿Cómo lograr que la cobertura realice las funciones que queremos que haga?
¿Qué variables afectan a las funciones de la cubierta?

## Preguntas Clave para la Construcción de Cubiertas

¿Cómo vamos a realizar la monitorización de la cobertura para conocer si está realizando lo que debe?

¿Mantendrá la cobertura el rendimiento, aumentará o disminuirá con el tiempo?

¿Durante cuánto tiempo siguen siendo eficaces?

¿Qué medidas correctivas serán necesarias implementar si la cobertura no cumple con las necesidades de diseño?

### 3.4.10.1 Tipos de Cubiertas

Los distintos tipos de coberturas son descritos a continuación, de mayor sencillez constructiva a mayor complejidad. Con el aumento en la sofisticación de la cobertura se incrementa el precio, y la necesidad de especialización y control durante la fase de construcción.

Las coberturas se clasifican en dos tipos básicos: “Húmedas” y “secas”. Las húmedas son aquellas en las que el material de desecho se encuentra cubierto por una capa de agua de modo permanente lo que significa el mantenimiento de un régimen de agua determinado para que sea efectiva, lo cual en regiones áridas es poco práctico en la mayoría de los casos (con la excepción de los lagos mineros). Las cubiertas secas pueden ir desde una simple capa de tierra, suelo o roca a los complejos sistemas de varios niveles construidos a partir de una gran variedad de materiales.



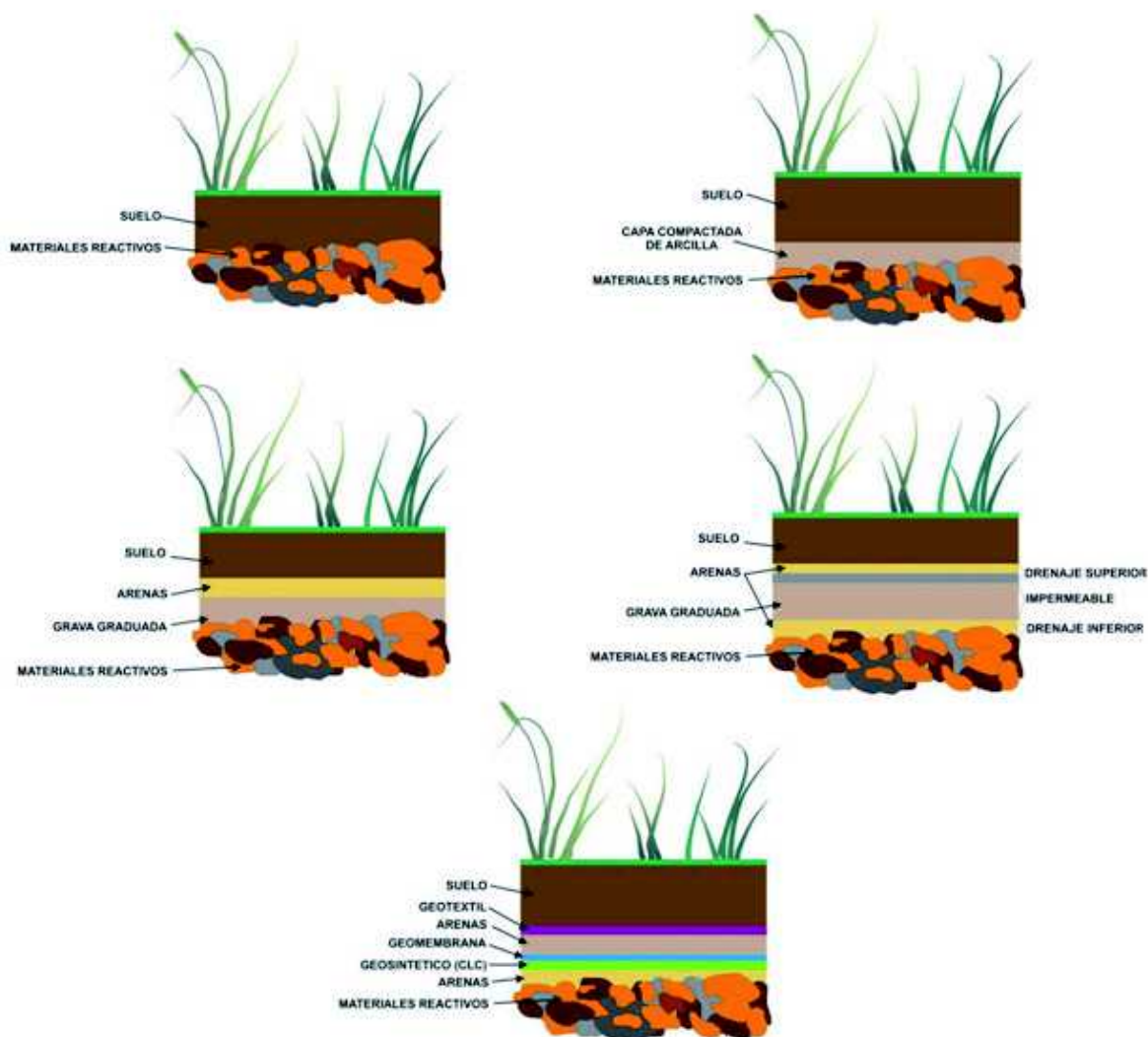
*Figura 3.39 Colocación del Geotextil de una Cubierta Seca. (TAILSAFE, 2007)*

Hasta hace pocos años el objetivo de la cubierta era generar una barrera para limitar la infiltración del agua hacia los residuos, mediante la incorporación de una capa de baja permeabilidad; y como objetivo secundario, estaba el servir de soporte para el crecimiento de la vegetación.

La investigación sobre el diseño de las cubiertas ha encontrado que es difícil o casi imposible construir una cubierta impermeable especialmente usando los materiales gruesos típicamente encontrados en zonas áridas y ha producido otro concepto de “Store and Release” (Almacenar y Liberar), en que la cubierta tiene una alta porosidad y el espesor suficiente para retener la precipitación durante



la estación lluviosa y luego, liberarla por evaporación durante la subsecuente estación seca. De esta manera no solamente la cubierta tiene la capacidad de absorber la precipitación, pero también mantiene la humedad suficiente para soportar vegetación y así formar una superficie más estable. (O’Kane, Christensen y Vasques 2007) y (Fourie y Tibbett, 2007)



*Figura 3.40 Distintos Tipos de Coberturas Secas*

### 3.4.10.2 Problemática Asociada a las Cubiertas

Si bien se trata de los mejores sistemas para evitar la generación de contaminación asociada a los residuos sólidos de la mina, es necesario tener en cuenta una serie de problemas asociados a este tipo de construcciones para evitar problemas durante la fase de post-clausura. A continuación se describen varias cuestiones que deben de ser tenidas en cuenta a la hora de realizar un diseño adecuado del recubrimiento.

El movimiento ascensional de sales y metales tóxicos desde el subsuelo formado por los lodos consolidados de una presa hacia la superficie de la capa de suelo productivo extendida sobre éste es un fenómeno importante dentro de la revegetación y que se atribuye a la elevación capilar, aunque

también colaboran otros procesos menos importantes como el de difusión (Mera et al., 1983). En climas áridos la elevación de las sustancias solubles de los Iodos varia desde los 10 cm hasta alrededor de 40 cm, dependiendo de las condiciones específicas de cada lugar (Barth, 1986). Como la elevación capilar va en función del tamaño de los poros y de la tensión superficial, un método práctico para luchar contra ésta consiste en cubrir las presas con una capa de grava de forma que los poros resulten demasiado grandes para que se produzca el transporte de esas sales solubles y se forme así una barrera capilar.

Cuando las raíces de las plantas entran en contacto con esos compuestos contaminantes puede producirse la muerte de éstas o la inhibición de su desarrollo, de ahí que la elevación capilar debe tenerse en cuenta en los procesos de revegetación de las presas de residuos. La altura de migración de las sustancias tóxicas depende de diversos factores tales como la textura del suelo, velocidad de percolación del agua, gradientes de concentración, lixiviación, tipos de minerales arcillosos, profundidad de suelo, tiempo de movilidad de iones, clima, etc. Aunque no es fácil predecir la magnitud de tales desplazamientos hacia la superficie se ha comprobado que son mucho más acusados en climas áridos que en climas húmedos, tal como se demuestra de forma indirecta por el pH de los suelos a diferentes profundidades.

Otro aspecto de la contaminación que se puede dar en una presa de residuos es conocido como “transporte biológico”, que tiene lugar por un lado cuando las plantas que constituyen la cubierta vegetal de esas estructuras son capaces de desarrollar suficientemente sus raíces para alcanzar el nivel de los Iodos. En estos casos se produce una transferencia a la superficie de ciertos constituyentes de los residuos tales como: selenio, molibdeno, radionucleidos y otros elementos nocivos que pueden pasar a la cadena de alimentación (Ayala et al., 2005). Por otro lado, en algunas situaciones el transporte biológico lo llevan a cabo pequeños mamíferos mediante la ingestión de plantas, suelos o agua, y la inhalación de polvo o vapores emanados de los residuos. En Idaho, en una presa de estériles de uranio cubierta con una capa de suelo de 0,6 a 1,2 m de espesor, algunos roedores extrajeron hasta la superficie cantidades equivalentes a 173 Kg de suelo por hectárea y año. Esta situación se puede evitar con la instalación de una capa de piedra gruesa en la cubierta que impide su excavación por roedores.

### **3.5 Fase de Cierre de la Explotación.**

Entre los factores que contribuyen a la clausura de las actividades mineras se incluyen:

- agotamiento de las reservas explotables económicamente;
- cambios en las condiciones del mercado;
- viabilidad financiera de la empresa;
- cuestiones medioambientales o políticas.

Una de las características principales de esta fase es que no existen operaciones productivas que generen el flujo de caja necesario para realizar las actividades de cierre. Por ello, la empresa deberá disponer provisiones adecuadas durante la fase de explotación para poder asegurar el buen término del cierre de la mina.

Idealmente, y con una buena planificación y gestión ambiental durante la fase productiva de la mina,

varias de las actividades de cierre se pueden llevar a cabo durante la explotación y así minimizar los gastos en el momento cuando el flujo de caja se encuentra reducido o ausente.

Los gastos principales durante la fase de cierre son gastos de personal de gestión del cierre, consultores especializados en el diseño y supervisión de las actividades de cierre, maquinaria para el movimiento de tierra asociado con la rehabilitación del área, y los costos de monitorización de los parámetros ambientales durante un período de 5 a 7 años para asegurar que no existen impactos a largo plazo.

### 3.5.1 Plan de Cierre

La tendencia en los países Sudamericanos en cuanto a la legislación que se requiere para la presentación de un Plan de Cierre como parte integral de la planificación y presentación del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental. El Plan de Cierre debe ser actualizado periódicamente (cada 3 años en el Perú y cada 5 años en Chile) y acompañado por una estimación del costo del cierre y monitoreo post-cierre. En Perú el reglamento minero requiere también la provisión de una garantía financiera (garantía bancaria, póliza de seguro etc.) equivalente al costo estimado del cierre, a efecto que el Estado cuente con los fondos necesarios para realizar el cierre, en el caso que la empresa minera no los tenga o simplemente abandone la mina.

Aún cuando el cierre de la mina y las operaciones de restauración del entorno son realizados en forma secuencial, los costos asociados a estas operaciones aumentan con el tiempo. Con la actualización periódica del Plan de Cierre también es importante actualizar el presupuesto para que este coste sea incluido en el balance financiero de la mina.

La estimación inicial del coste ejercicio ayuda a una empresa a centrarse en los puntos de la clausura donde existe la mayor incertidumbre en los resultados. Esto permite fijar las prioridades que se establecerán para los futuros trabajos de investigación y estudios necesarios para definir los mejores resultados (Botin, 2009).

La siguiente Figura ilustra el ciclo de vida típico de un proyecto para minas de tamaño medio en Australia. El valor que cabe destacar como clave a la vista de este diagrama es que la fase de explotación de un proyecto minero puede ser inferior al 30% del tiempo que una empresa minera tiene una presencia activa en el emplazamiento.



*Figura 3.41 Ciclo de Vida de una Mina Típica de Tamaño Medio en Australia*

Comenzar la planificación de la rehabilitación en las primeras fases de una operación permite tener en cuenta el máximo número de opciones o estrategias de rehabilitación posibles.

**Tabla 3.17 Claves para el Cierre de una Operación Minera**

Claves para el Cierre de una Operación Minera
Promover el cierre ordenado en lugar del abandono de los emplazamientos 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 terreno en condiciones ambientalmente aceptables para su uso posterior
Mejorar la percepción pública sobre la minería

Históricamente se han contado como fracasos las operaciones de clausura y rehabilitación cuando han sido llevadas a cabo sin tener los objetivos claramente definidos. Un ejemplo frecuente de ello son las escombreras que han sido “cerradas” sin tener en cuenta una serie de pautas fundamentales para realizar las cubiertas de las mismas. En el caso más desfavorable esto se ha traducido en la pérdida del valor de las obras realizadas y la necesidad de una completa revisión de la rehabilitación. Las consecuencias de ello no son sólo financieras, sino también implican mayores plazos en la cesión del emplazamiento más allá de todos los horizontes de planificación.

**Tabla 3.18 Contenido Técnico de un Plan de Cierre**

Contenido Técnico de un Plan de Cierre.
Estrategia, objetivo y criterios de cierre
Marco regulatorio
Descripción de las instalaciones y operación
Descripción del entorno
Análisis de riesgos
Area de influencia de las instalaciones
Plan de cierre
Programa de monitoreo pre-cierre
Plan de seguimiento y monitoreo ambiental post-cierre
Estimación de costes

El contenido técnico del Plan de Cierre, presentado a la autoridad competente, es normalmente establecido por la autoridad en su Guía para la preparación de Planes de Cierre de Minas, con el objetivo de tener documentos más fáciles de revisar, asegurando que contienen la información básica

y comprensiva respecto a la operación minera, sus potenciales y actuales impactos, y un factible y aceptable Plan de Cierre con las adecuadas medidas de mitigación. El contenido típico que suele contener el documento Plan de Cierre se presenta en la anterior Tabla 3.18. Teniendo en cuenta que cada país normalmente tiene una legislación propia que explica los contenidos que deberá contener, en la tabla se exponen los más habituales, lo cual no es óbice para que en un país determinado se exijan más o menos aspectos:

Los principales aspectos que el Plan de Cierre debe enfrentar se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 3.19 Aspectos Principales de un Plan de Cierre**

Aspectos Principales de un Plan de Cierre
Seguridad de personas
Estabilidad física a largo plazo
Estabilidad química a largo plazo
Eliminación o reducción a niveles aceptables de impactos ambientales
Mitigación del impacto social del cierre de las operaciones
Uso productivo de las tierras (donde sea factible)

### 3.5.2 Impactos del Cierre sobre el Medio Hídrico

Cuando se produce el cierre de una operación minera a cielo abierto o subterránea, su mantenimiento normalmente se detiene y suele producirse el cese en las operaciones de bombeo. En general, cuando no existen galerías de drenaje en los niveles más bajos, se produce un proceso de inundación de las antiguas labores mineras. Durante este proceso de inundación, controlado o incontrolado, se generan en función del tipo de operación minera lagos mineros (en el caso de operaciones a cielo abierto) o acuíferos pseudokarsticos de triple porosidad (en el caso de minas subterráneas). Eventualmente, en algunos casos el proceso de inundación de la mina provoca que el agua de mina se desborde y vaya a parar a los cursos de agua próximos.

#### 3.5.2.1 Rebote

Este fenómeno por el cual una mina se inunda una vez cesan las operaciones se denomina rebote de agua de mina y es sencillo conceptualmente. Al cesar el bombeo el agua que accede a las labores mineras, en vez de salir al exterior con el bombeo, se acumula en los huecos mineros abandonados, hasta que estas están inundadas al nivel de la cuenca hidrográfica en la cual están enclavadas (Younger, 1999).

Pero realmente el fenómeno del rebote de agua de mina es mucho más complejo, dado que se pueden producir procesos como la disminución de caudal o flujo de agua que accede a las labores, debido a una reducción del gradiente hidráulico entre los acuíferos cercanos y las labores mineras, variaciones en el coeficiente de almacenamiento debido a la presencia o ausencia de acuíferos de triple porosidad como consecuencia de las labores mineras, cambios repentinos en la integridad de las labores mineras, etc. (Younger, 2002, Younger y Loredó, 2008).

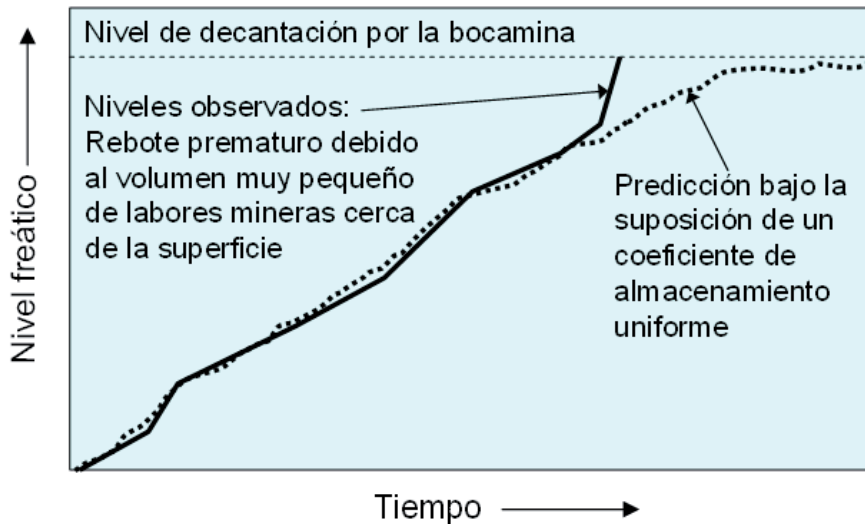
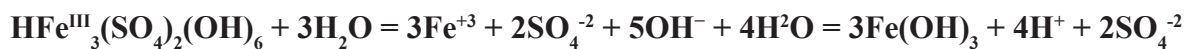


Figura 3.42 Rebote de Agua en una Mina Subterránea tras el Cierre

### 3.5.2.2 Primer Lavado

Como se ha explicado en la Sección 3.4.5.2, en las labores mineras se pueden acumular cantidades muy considerables de Minerales Generadores de Acidez (MGA) que contienen metales y sulfatos fácilmente solubles. Cuando las labores se inundan, el agua por lo general disuelve los MGA y el agua ácida contenida en los poros de las rocas en las proximidades de las labores mineras. Este proceso genera aguas fuertemente ácidas y contaminadas, por ejemplo en el caso de la jarosita:

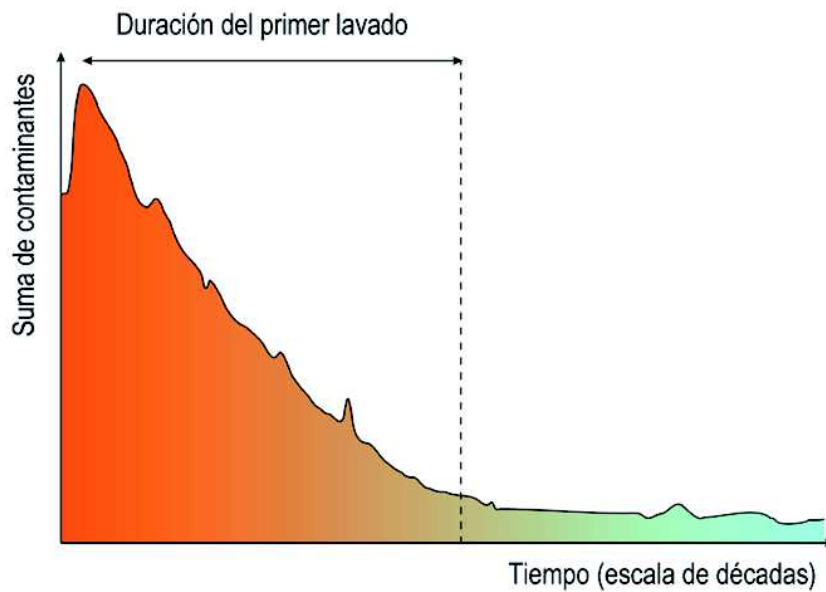


Por ello, el agua que inicialmente llena las labores y se descarga de una mina en cierre o abandonada puede ser mucho más agresiva ecológicamente (ácida y con concentraciones muy altas de sulfato y metales) que la que se extrae de la mina durante la operación. Este fenómeno ha sido documentado ya a mediados del siglo XX en Durham, Reino Unido, por Cairney y Frost (1975). Subsiguientemente, Younger (1997) lo denominó “primer lavado” de una mina.

La duración del primer lavado depende de las características de cada mina, de la naturaleza y cantidad de MGA que se han acumulado, y la tasa de recarga (cantidad de agua que entra a la mina). Debido a los procesos de disolución y dilución de los MGA, la concentración de contaminantes suele decaer de manera casi-exponencial, hasta llegar a una concentración de fondo. El nivel de contaminación residual puede ser alto o bajo, dependiendo el cada lugar.

El primer lavado puede durar entre años y siglos. Younger (2000) observó en varias minas del Reino Unido que el primer lavado dura aproximadamente cuatro veces el tiempo de llenado de todos los huecos mineros. Sin embargo, el factor 4 solo es un promedio. En el estudio de Younger (2000) se observó un rango de entre 1 y 10; en dos minas de Polonia se observaron factores de 10 a 20 (Gzyl y Banks, 2007). Por lo tanto, existe un margen de incertidumbre grande en la estimación de

la duración del primer lavado. En las zonas áridas y semiáridas el primer lavado puede tardar más que en zonas húmedas, ya que la tasa de recarga es menor y el tiempo de llenado es mayor.



**Figura 3.43 Primer Lavado**

Debido a las concentraciones potencialmente muy altas de contaminantes, hay que prever un tratamiento adecuado durante el periodo de primer lavado. Es importante instalar el sistema con antelación, ya que en el apartado anterior se ha visto que el tiempo de llenado de las labores también tiene un rango de incertidumbre.

### **3.5.2.3 Cambios permanentes en el balance de agua**

En aspectos de balance hidrológico, las afecciones provocadas por la clausura de una operación minera pueden llegar, también, de la mano de variaciones en las tasas de evaporación, especialmente cuando quedan áreas inundadas, lagos mineros y depósitos de estériles, inclusive, se producen modificaciones en la evapotranspiración, en las áreas revegetadas, y de los propios humedales creados para tratamiento de las aguas de drenaje.

Es importante destacar, en el caso del cierre de minas, que las condiciones pueden variar de manera muy notoria respecto a las presentes durante el periodo de actividad, en el que, por ejemplo, se drenaba mediante bombeo en sondeos en la periferia, o desde el propio hueco minero. Al suspenderse el drenaje, tras la clausura, la piezometría retorna a las nuevas condiciones de equilibrio potenciométrico, imponiendo unos flujos diferentes a los de la operación minera.

En este momento, tras la actividad minera, el comportamiento del sistema hidrogeológico se puede ver modificado, como consecuencia de la interconexión de acuíferos o de la conexión entre aguas superficiales y subterráneas.

Cuando se han construido galerías de drenaje, pozos horizontales o estructuras similares, el nivel

freático puede mantenerse deprimido respecto a las condiciones antes de la apertura de la mina, lo que puede afectar de forma negativa a los ecosistemas y a otros usuarios que dependen del agua subterránea.

El cese del bombeo también puede tener consecuencias negativas, al disminuirse el flujo de base en los cauces a los que se descargaba el agua:

- Pueden secarse hábitats ecológicos importantes (p.ej. ocurrió con el humedal RAMSAR de Grootvlei, África del Sur)
- Puede disminuirse el efecto de dilución de otras descargas contaminantes en la cuenca, por ejemplo aguas residuales domésticos o industriales, notándose mucho más esta contaminación.
- Puede significar el cese de riego de bosques etc. que se cultivaron durante la fase de explotación.

Por lo tanto, puede ser recomendable que las bombas no se apaguen de golpe, sino que se disminuya la tasa de bombeo paulatinamente para observar los efectos y tomar medidas correctoras si fuera necesario.

### **3.6 Fase Post-Cierre**

#### **3.6.1 Tareas en la Fase de Post-Cierre**

Una vez que las operaciones mineras han terminado y se hayan restauradas, con las balsas de lodos y las escombreras selladas para evitar la generación de aguas ácidas o contaminación por arrastre de finos, comienza la fase Post cierre. Esta fase se extenderá de acuerdo a la legislación de cada país o de la política ambiental de la compañía.

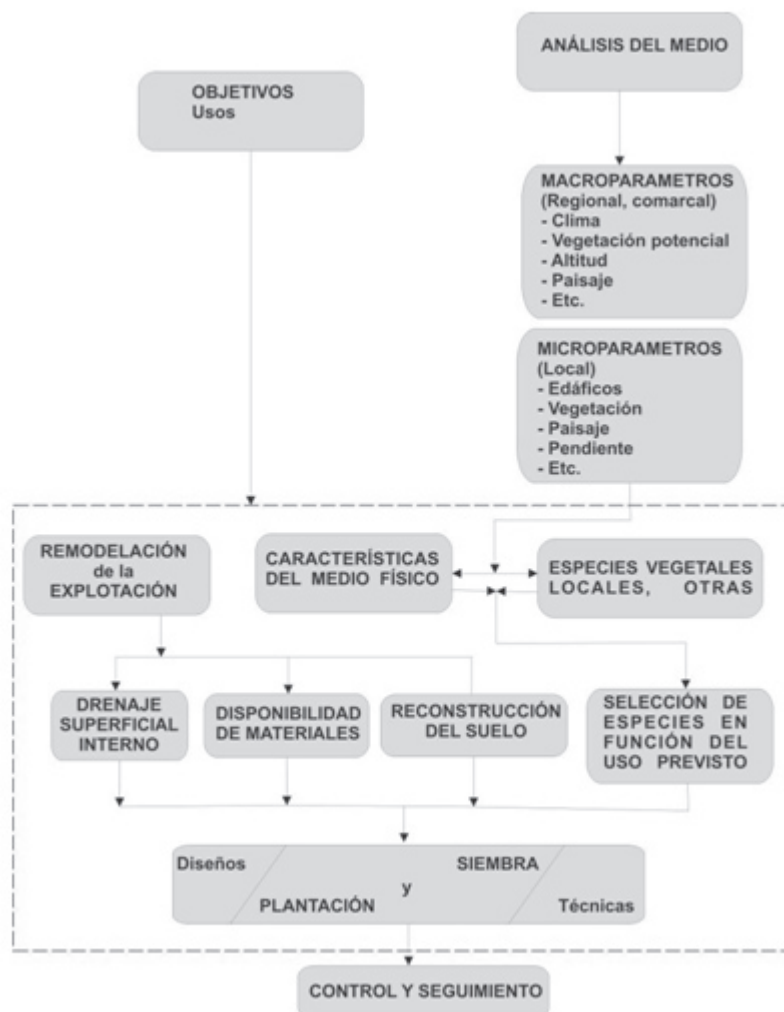
Como se mencionó en la sección 2.6.3.3, durante la fase de post-cierre continúa la monitorización del área de influencia de la operación minera. Este proceso de monitorización se realiza para asegurar que no existe ningún proceso dentro de área de la mina que pueda producir un efecto adverso en el medio ambiente. Además sirve como media de control de los sellados de las balsas de lodos y las escombreras. La calidad del agua subterránea se monitoriza y analiza para evaluar la influencia de la inundación de las labores mineras sobre los acuíferos.

#### **3.6.2 Puesta en Uso Productivo de los Terrenos Recuperados**

En principio puede parecer que en las regiones áridas y semiáridas de Sudamérica no es necesario tener en cuenta las mismas consideraciones para la fase post-clausura que en el continente europeo, dado que en Europa la limitación espacial es importante, y la mayor parte de las minas se encuentran cerca de áreas pobladas densamente, mientras que en Sudamérica las operaciones mineras normalmente se hallan alejadas de las poblaciones. Es quizás un error de concepto muy común, pero en la moderna minería que se quiera definir como sostenible debe de tenerse este principio de uso productivo, aunque sea para la generación de pastizales con herbáceas típicas del entorno natural de la mina (Ramani, 2009).



Es por ello que en este apartado se tratará de manera breve la puesta en uso de los terrenos restaurados en el entorno de la operación minera, aunque la perspectiva obviamente no puede ser la misma que en Europa, Canadá, EEUU o Australia.



**Figura 3.44 Factores del Medio Físico a Tener en Cuenta y Acondicionamiento del Terreno para Instaurar un uso Determinado. (Ayala, 2004)**

La definición del “uso productivo” influye de manera especialmente significativa en las formas de restaurar las balsas de lodos y escombreras. Normalmente el uso productivo se define a partir de los usos que poseen los terrenos que circundan a la mina, además de considerar la política seguida en la integración en el paisaje.

La recuperación puede consistir entonces en la instalación de una simple cubierta vegetal protectora, utilizando especies autóctonas, hasta el aprovechamiento agrícola de los terrenos, si se dispone de un sustrato adecuado. Actualmente se pueden crear estos sustratos de manera artificial con una mezcla adecuada de residuos provenientes de distintas actividades industriales y ganaderas. En el apartado dedicado a los pasivos mineros se hace referencia a los tecnosoles, suelos artificiales empleados para la restauración de ecosistemas degradados.

Si las actividades mineras continúan después del abandono de las balsas y escombreras, un uso productivo posible en muchos casos es la recuperación de minerales a partir de los lodos depositados. Los cambios tecnológicos en los procesos mineralúrgicos y las cambiantes condiciones económicas hacen que los depósitos de residuos se revaloricen en el transcurso del tiempo llegando a ser rentable su reexplotación y aprovechamiento.

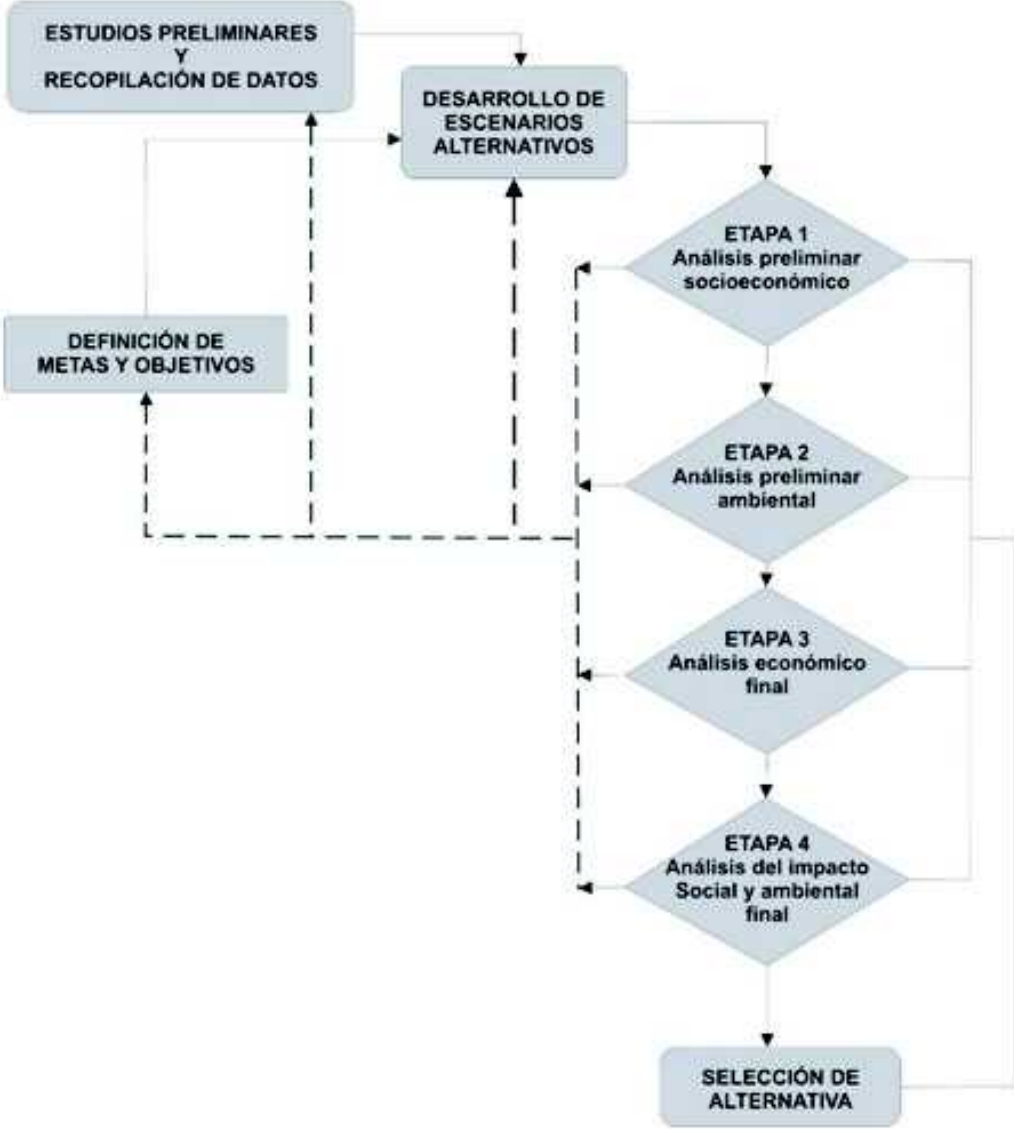


Figura 3.45 Proceso para la Evaluación de Usos Alternativos del Terreno. (Ayala, 2004)





**GESTIÓN DE AGUA EN LA MINERÍA  
ARTESANAL Y A PEQUEÑA ESCALA**



## 4 GESTIÓN DE AGUA EN LA MINERÍA ARTESANAL Y A PEQUEÑA ESCALA

### 4.1 Introducción

En muchas regiones del planeta la explotación de algunos recursos minerales se desarrolla de manera artesanal. Las tecnologías usadas para la recuperación de los metales en muchos casos sigue siendo la misma que a principios del siglo XX. La mecanización es testimonial y mayoritariamente inexistente.

En la mayor parte de las áreas en las que las operaciones mineras son desarrolladas a pequeña escala o artesanal, suele ser habitual la aparición de conflictos con las comunidades que circundan la zona. Este hecho está muy influenciado por la incapacidad técnica y/o económica para hacer frente a las medidas que se deberían implementar para minimizar el impacto ambiental producido. En todas estas áreas mineras donde se ha producido o se produce en la actualidad una explotación de estas características, los recursos hídricos superficiales o subterráneos se hallan seriamente contaminados; el legado de pasivos mineros asociados a esta minería es demasiado elevado en algunas cuencas, y la inversión necesaria para revertir los efectos perjudiciales inducidos y remediar la situación es demasiado elevada.

#### 4.1.1 Diferencias entre la Minería Artesanal y a Pequeña Escala

La minería a pequeña escala y la minería artesanal no poseen el nivel de inversión necesario para llegar a desarrollar proyectos de envergadura. Por definición la pequeña minería es aquella que se desarrolla sobre pequeños yacimientos minerales o tiene una escasa importancia económica a nivel global, mientras la minería artesanal es aquella que utiliza los métodos más básicos de extracción y procesamiento de los minerales.

Una característica muy marcada de la minería a pequeña escala es que es más extensa y por lo general más mecanizada, mientras la minería artesanal puede involucrar solamente a personas o familias y se realiza en forma exclusivamente manual. Otro hecho diferenciador está en la naturaleza de los derechos que los mineros poseen sobre los terrenos que explotan. En muchas ocasiones, las minas a pequeña escala están en posesión de un título legal de propiedad sobre la concesión explotada, reconocido por el Estado y por otros entes. En otros casos, trabajan la tierra que tradicionalmente han habitado, pero sin que exista un reconocimiento explícito por parte del Estado sobre los derechos de propiedad, o trabajan informalmente y son considerados ocupantes ilegales por las autoridades locales y del Estado. De los dos grupos, es más probable que sean los mineros artesanales quienes trabajen sin un permiso de explotación legal.

A pesar de estas diferencias, la minería a pequeña escala tiene características en común con la artesanal que permiten estudiarlas en conjunto, tales como:

- Explotan depósitos marginales, pasivos mineros, depósitos de pequeña envergadura.
- Capitales muy bajos.

- Bajos índices de recuperación, a pesar de jornadas intensivas de trabajo.
- Acceso insuficiente a los mercados y servicios de apoyo.
- Carecen de medidas adecuadas de seguridad e higiene.
- Impacto significativo en el medio ambiente.

#### **4.1.2 Ciclo de Vida de la Minería Artesanal y a Pequeña Escala**

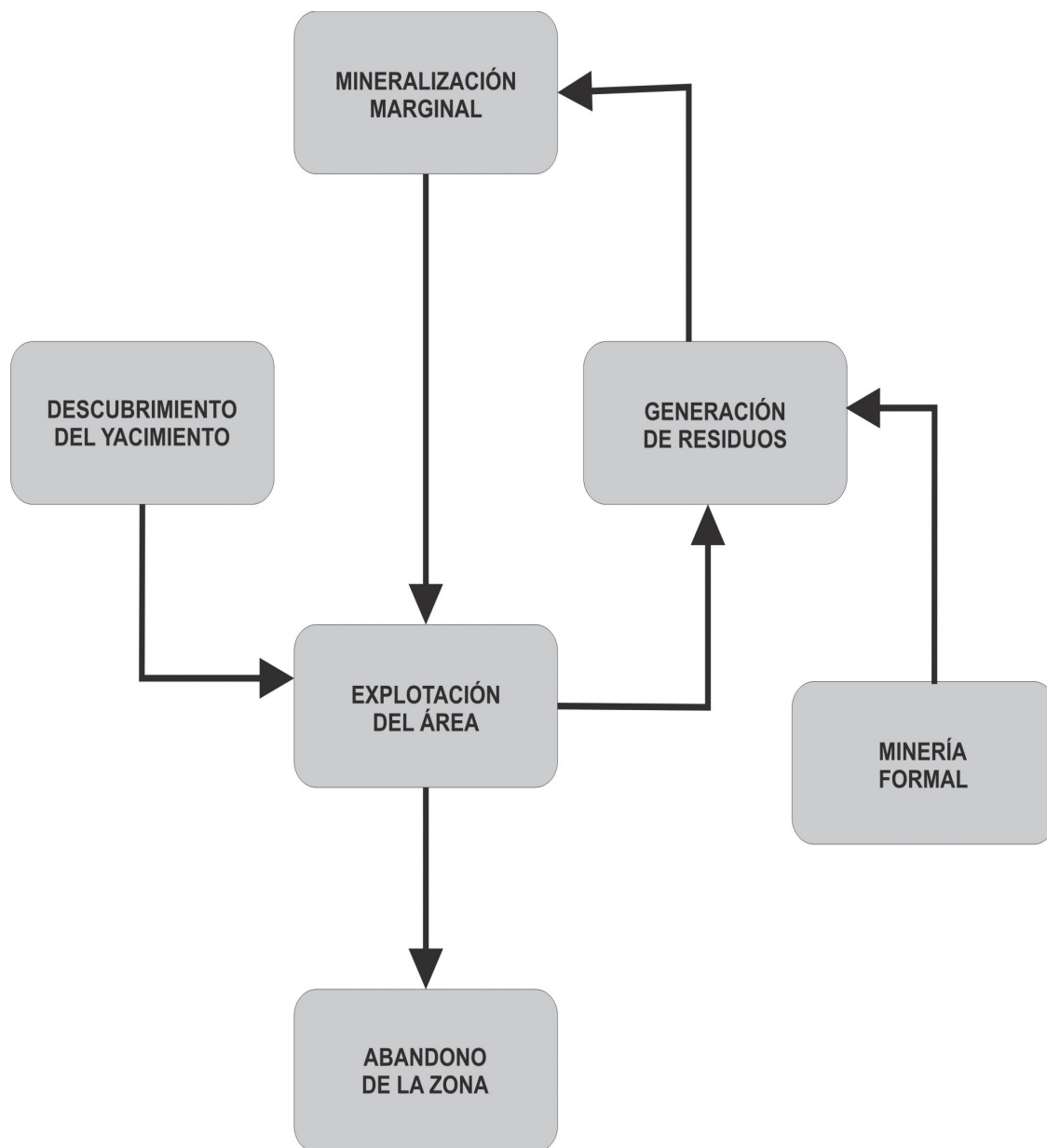
El ciclo de vida de la minería artesanal (figura 4.1) posee características propias y diferenciadas. No existe una fase exploración y evaluación económica, en este caso esta fase se haya sustituida por una fase de descubrimiento de yacimiento; en unos caso este descubrimiento es un proceso aleatorio, en otros explotan áreas que han descubierto compañías mineras formales, pero por motivos sociales no se les permitió explotar, implantándose con posterioridad en el área los mineros informales.

La fase de explotación puede prolongarse por muchos años dados los métodos rudimentarios para beneficiar el material, con lo que el impacto en el medio se prolongará por periodos muy largos, lo que generará un conflicto social. La fase de abandono una vez agotado el yacimiento deja un gran pasivo ambiental que no puede ser controlado, dado que durante la fase anterior la disposición de los residuos no ha seguido normas coherentes y ha sido incontrolada;

Un tipo de minería artesanal peculiar es la practicada en algunos lugares, p.e. Bolivia, donde lo que se explota no es un yacimiento mineral, sino los residuos de las balsas de flotación de las operaciones mineras a mediana o gran escala.



**Figura 4.1 Explotación Artesanal de una Balsa de Lodos Abandonada en Bolivia**



*Figura 4.2 Ciclo de Vida de una Mina Artesanal*

## 4.2 Impactos Asociados con la Artesanal y a Pequeña Escala

A continuación y de modo esquemático vamos a describir los impactos que produce la minería artesanal y a pequeña escala sobre factores diversos de la sociedad y el medio físico. En la primera tabla se expondrán los impactos sobre el medio social y cultural por una parte y por otra el impacto que genera sobre el medio económico. En la segunda por su parte se describen los impactos en el medio ambiente, el biótico y el visual. Se ha tratado de exponer de modo sucinto y visual la incidencia que tiene este tipo de operaciones mineras sobre las áreas afectadas.



**Tabla 4.1 Impactos Típicos de las Operaciones Mineras Pequeñas en el Medio Socioeconómico y Cultural**

MEDIO IMPACTADO	COMPONENTE	IMPACTOS GENERADOS	
Medio Socioeconómico y Cultural	Social y Cultural	Uso del territorio	Cambio de uso <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abandono de actividades tradicionales</li> </ul> Desarrollo urbano <ul style="list-style-type: none"> <li>• Creación de asentamientos mineros</li> <li>• Zonas verdes</li> <li>• Tala de bosques</li> <li>• Pérdida de vegetación</li> </ul>
		Cultural	Educación Arqueología industrial Restos arqueológicos Estilo de vida
		Infraestructura	Comunicaciones equipamiento
		Comunidad	Calidad de vida Seguridad ciudadana Riesgos catastróficos Salud e higiene Densidad de población Nivel de empleo <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relaciones sociales</li> </ul>
	Económico	Economía	Nivel de consumo Cambio de precios Cambio del valor del suelo Ingresos administrativos Ingresos en la economía local

Los impactos que se generan durante la actividad minera artesanal tienen la problemática añadida de que producen un rápido deterioro de la calidad ambiental, especialmente si se explotan balsas de lodos, dado que la formación de los mineros artesanales en materia ambiental es inexistente o muy deficiente. Su mayor preocupación es el lograr un beneficio económico rápido, que les ayude a salir de la pobreza. El efecto que produce esta minería de rapiña, es un empobrecimiento ambiental debido a la mala praxis de algunos de estos mineros. El impacto generado será difícilmente minimizado

debido a la carencia de medios económicos para hacer frente al coste necesario para evitarlos. Las aguas serán el medio más rápidamente impactado, y el primero que mostrara los problemas derivados de estas actividades (ver figura 4.2).

**Tabla 4.2 Impactos Típicos de las Operaciones Mineras Pequeñas en el Medio Físico**

MEDIO IMPACTADO	COMPONENTE	IMPACTOS GENERADOS	
Medio Físico	Ambiente	Atmósfera	<p>Deterioro de la calidad del aire</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vapores de mercurio</li> <li>• NO<sub>x</sub></li> <li>• SO<sub>2</sub></li> <li>• Gases de tostación</li> </ul> <p>Generación de polvo</p> <p>Ruidos</p>
		Terreno	<p>Contaminación</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escombreras</li> <li>• Mercurio</li> <li>• Reactivos</li> <li>• Hidrocarburos</li> </ul> <p>Esterilidad edáfica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Movilización de suelos fértiles</li> <li>• Recubrimiento con estériles de capas fértiles</li> <li>• Destrucción de tierras agrícolas</li> <li>• Erosión</li> </ul> <p>Valorización mineralógica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja recuperación de mineral</li> </ul> <p>Vibraciones</p>
	Ambiente	Agua	<p>Alteración de los cursos fluviales</p> <p>Deterioro de la calidad del agua</p> <p>Modificaciones hidrogeológicas</p>

MEDIO IMPACTADO	COMPONENTE	IMPACTOS GENERADOS	
Medio Físico	Biótico	Flora	Especies herbáceas <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desmontes</li> <li>• Quemadas de vegetación</li> <li>• Especies forestales</li> </ul> Deforestación
		Fauna	Terrestre <ul style="list-style-type: none"> <li>• perturbación de hábitats</li> <li>• caza incontrolada</li> </ul> Acuática <ul style="list-style-type: none"> <li>• perturbación de hábitats</li> <li>• contaminación</li> </ul>
	Visual	Paisaje	Alteración paisajística

Un país con una minería artesanal y a pequeña escala muy importante es Bolivia; en él podemos encontrar dos tipos de minería que podríamos definir de pequeña escala, la minería realizada por las cooperativas y la artesanal, es por ello que trataremos de mostrar la problemática de este tipo de minería mediante la descripción de las características que posee este país.

### LA MINERÍA DE LAS COOPERATIVAS BOLIVIANAS

Ésta es realizada por hombres y mujeres que pertenecen a grupos cooperativos que pueden llegar a estar formados por entre 900 a 1000 personas en las cooperativas grandes, de 400 a 500 en las intermedias y de 80 a 100 en las pequeñas. Trabajan las antiguas concesiones que fueron propiedad del Estado Boliviano a través de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) o de antiguas minas privadas en fase de abandono.

La producción se realiza de manera autónoma dentro de las cooperativas: los socios buscan un área en la mina y lo explotan sin intervención de la directiva, con la posibilidad de asociarse entre varios socios si el paraje lo permite. El tiempo de explotación de esta área puede variar de unos meses a varios años. En el caso de una explotación larga, los socios acondicionan un rincón para guardar sus herramientas y ropa, ponen una radio si tienen electricidad en la mina. La mayoría de los socios cierra su zona de trabajo con una puerta de madera y un candado para evitar el robo de herramientas o de mineral.

La primera etapa de la producción es la perforación de varios agujeros para colocar explosivos. Después de la explosión, hay que esperar unas horas (generalmente hasta medio día), según la ven-

tilación, a que baje y se disperse el polvo, entonces se ingresa nuevamente a seleccionar el mineral (“palleo”), separándolo de la carga a golpes de martillo. Se saca entonces el mineral seleccionado para comercializarlo, o toda la carga cuando se dispone de un trole, con procesamiento previo en algunas cooperativas.

Los horarios de trabajo dependen de la organización de cada cooperativa: cuando se baja y sube a los niveles de la mina por una jaula (ascensor rudimentario), la cooperativa define horarios de entrada y salida, para que la jaula no funcione todo el día. La cooperativa puede entonces definir que se trabaje en varias puntas (turnos de trabajo distribuidos en todo el día) o sólo con un horario diurno. Si se trabaja por puntas, puede haber dos puntas al día, o hasta tres, con una punta nocturna. En las cooperativas donde no hay jaula la entrada es en general libre y cada socio o cuadrilla define su propia organización. Sólo las cuadrillas numerosas en general se dividen en general por puntas.

## LA MINERÍA ARTESANAL QUE SE PRACTICA EN BOLIVIA

Las especiales características de la minería artesanal boliviana hacen necesario diferenciarla de la que se practica en otras áreas de Sudamérica, no sólo por el esfuerzo de la mujer minera en Bolivia que merece el reconocimiento de propios y extraños. Un ejemplo lo constituyen las mujeres cooperativistas que trabajan en las laderas del cerro Posokoni o en las orillas del río Huanuni (subcuenca del Poopó) rescatando los últimos resquicios de estaño que la mina desecha.

Una vez que el mineral es extraído por los mineros desde los socavones en despojos de diferente tipo, como piedras enteras o procesadas en molinos y los restos descartados por los ingenieros, las “palliris” comienzan su trabajo, armadas con martillos y cincel, para recuperar el estaño que la tecnología no ve. El trabajo de las palliris consiste básicamente en juntar el mineral que queda en las laderas del cerro.

Las mujeres que trabajan en el río Huanuni obtienen la concentración del mineral a través de un proceso de lavado y por otra parte mediante la recuperación gravimétrica. Para este fin, el agua del río es recolectada por canales formando una pequeña represa de acumulación principal de agua que luego desemboca en un estanque circular denominado Buddle de 1 metro de diámetro por 0,7 m de profundidad aproximadamente. Una pequeña salida de agua se encuentra en el lado opuesto a la entrada de manera que forma un movimiento circular dentro de la piscina. Existen uno ó dos tamicos ubicados en la desembocadura, que requieren de experiencia necesaria para utilizarlos (Trujillo, 2005).

El material seleccionado es introducido en pequeñas porciones para permitir el lavado sucesivo, la clasificación por los cedazos finos, y por último la separación gravimétrica de la fracción pesada en el centro del Buddle. La fracción más grande es retirada y molida en un mortero (quimbalete) y puesta en otro Buddle (semejante a un disco del arado) para su lavado y separación gravimétrica (Trujillo, 2005).

La fracción fina, pesada, rica en casiterita, es periódicamente retirada de la parte central del Buddle. La fracción rica en mineral es lavada una vez más. Esta fase del proceso lleva de 8 a 14 días. Para retirar las impurezas de los concentrados de estaño (p.ej. pirita) se usan reactivos químicos como ácido sulfúrico, xantato, kerosén ó aceite para lograr una flotación rudimentaria (Trujillo, 2005).

Para el tratamiento del concentrado rico en sulfuro se usan aproximadamente 3 Kg de xantato y 5 Ltr. de ácido sulfúrico para cuatro bolsas de concentrado (entre 100 y 120 Kg aproximadamente). Las cantidades de reactivos usados dependen del contenido de pirita. El concentrado es secado antes de su comercialización (Trujillo, 2005).

Los rendimientos calculados por Trujillo (2005) indican que el promedio de producción de las mujeres palliris de las cooperativas del departamento de Oruro es de 65.43 Kilos con una Ley del 50.95% en contenido de mineral de estaño, llegando a producir 33.35 Kilos finos de estaño durante un mes laboral. Según el precio promedio durante el presente trabajo, la ganancia estimada es cercana a los 100 a 120 US\$/mes, según la naturaleza de los desmontes que se trabajan.

#### **4.2.1 Fase de Explotación**

Una vez que se ha mostrado cómo es el trabajo en la minería artesanal en Bolivia para centrar el tema que nos ocupará en este apartado, se ve que dentro de la minería artesanal y a pequeña escala, debemos definir dos modelos de explotación distintos. Por un lado la explotación directa del recurso y por otro la reexplotación de las balsas de lodos de las minas abandonadas para recuperar minerales de las concentraciones residuales de las mismas.

La minería artesanal se caracteriza por un ciclo vicioso de pobreza: el descubrimiento, la migración, y relativa prosperidad económica van seguidos por el agotamiento de los recursos, la emigración y la miseria económica. Tras el agotamiento de las reservas fácilmente explotables, los emplazamientos son abandonados, y los mineros permanecen frente a un legado de medio ambiente devastado y la pobreza extrema. Estas personas tienen pocas oportunidades de escapar de su circunstancias (Veiga y Hinton, 2002).

A pesar de los aspectos negativos vinculados a la minería artesanal existe un movimiento que asegura que esta desempeña un papel esencial en las sociedades en desarrollo (Moody, 2003.). Estas pequeñas minas pueden ser una importante fuente de ingresos para las comunidades rurales de las regiones áridas, y pueden proporcionar ingresos para la inversión. Los mineros artesanales pueden explotar un depósito mineral considerado antieconómico por la industria moderna. Por cada dólar generado por la minería artesanal se genera alrededor de tres dólares en puestos de trabajo no relacionadas con ella. “La minería artesanal debe fomentarse; sin embargo, el mal estado de salud asociado, la seguridad y las condiciones ambientales deben ser mejoradas” (Moody, 2003).

La minería aurífera artesanal representa alrededor del 50% de la minería artesanal y a pequeña escala. En este tipo de minería el sistema de amalgamación con mercurio es el método de extracción más utilizado por mineros de todo el mundo, dado que se trata de un proceso sencillo y barato, lo que lleva a beneficios rápidos, pero es ineficiente y se genera un vertido de mercurio al medioambiente. El legado más común de la minería artesanal del oro es la contaminación por mercurio. Por ello, más abajo nos centraremos especialmente en las tecnologías para su gestión.

Las minas de montaña asociadas a la minería artesanal, al carecer de planificación durante la fase de explotación, generan una maraña de galerías, chimeneas y planos inclinados, que cortan acuíferos y generan surgencias no controladas, que son vertidas desde la bocamina más baja que se encuentre por debajo del nivel freático. La impredecibilidad de los puntos de descarga es un impacto añadido, dado que hace muy difícil predecir los puntos donde es necesario ubicar un tratamiento para la

descarga.

Esta maraña de galerías hace que el funcionamiento hidrológico de estas minas sea muy complejo de predecir. Posee un funcionamiento hidrológico pseudokárstico, al igual que el de las minas de interior de la minería a gran escala, pero con la diferencia de que en el presente caso no existe control de la subsidencia generada por la explotación de los recursos. Esto genera una permeabilidad secundaria que hace que las pocas precipitaciones que puedan caer en el área de influencia de la mina se infiltren con rapidez.

Para la mayoría de los conservacionistas ambientales la única solución aceptable para eliminar la contaminación producida por la minería artesanal es eliminar estas actividades. Sin embargo, la problemática existente radica en que ni los ecologistas ni los gobiernos poseen un sistema adecuado para hacer cumplir las leyes o para prestar servicios sociales y económicos que sirvan de estímulo para sustituir a los beneficios generados por esta economía informal.

#### **4.2.2 Gestión del mercurio**

El Mercurio (Hg) es una de las sustancias tóxicas más peligrosas. Al ser inorgánico, es un elemento que no puede destruirse a través de reacciones químicas, ni se descompone en compuestos inocuos para el organismo humano o el medioambiente.

Los niveles de mercurio en el medio ambiente han aumentado de manera espectacular desde el comienzo de la industrialización. La contaminación principal por mercurio son las emisiones al aire debidas a la combustión del carbón, pero el mercurio es liberado también de una variedad de fuentes directamente a la tierra y el agua. El mercurio tiene una persistencia en el medio ambiente muy alta (PNUMA, 2002) y aunque la legislación se ha vuelto más estricta y existen cada vez más alternativas disponibles en el mercado, los vertidos de mercurio continúan.

La pequeña minería de oro es una de las fuentes principales de contaminación por mercurio, dejando fuera aproximadamente 500 - 700 toneladas de mercurio en el medio ambiente cada año (Paulo de Souza y Freitas, 1999). Se ha calculado que las operaciones realizadas en los quimbaletes tienen unas pérdidas de unos 200 gramos por tonelada de mineral tratado.

Si bien actualmente existen tecnologías en algunas regiones para la gestión adecuada del mercurio, como por ejemplo las retortas comunales, éstas no han llegado a implantarse entre las usadas por la mayoría de los mineros artesanales.

Algunos autores defienden la posibilidad de utilizar técnicas de cianurización para obtener el oro contenido en la mineralización (Lara, 2003), pero las malas experiencias en algunas zonas desaconsejan su uso (Reynoso, 2003). Aun así parece que ciertas cooperativas y comunidades de mineros artesanales apuestan por las tecnologías de lixiviación en pilas o estanques basadas en plantas portátiles dadas las carencias de agua en estas regiones áridas y semiáridas (Reynoso, 2003; Lara, 2003).

Entre las ventajas apuntadas, aparte de la eliminación del mercurio, está el aprovechamiento de menas marginales de oro, mejorando la recuperación del mismo (Reynoso, 2003; Lara, 2003; Paulo de Souza y Freitas, 1999).

Según Lara (2003) estos equipos son de manejo sencillo y unos bajos costes de operación; el problema de este tipo de equipos radica en la necesidad de formación y capacitación, para que el uso y manejo del cianuro sea adecuado ambientalmente.

Por otro lado se hace necesario convertir a los mineros artesanales a un nuevo modelo formal, que encaje en el marco normativo de cada país, para que las operaciones pasen a ser realizadas dentro del régimen ambiental, y puedan así ser controlados los vertidos de manera adecuada por el ente inspector en materia de minería y medioambiente.

Este cambio tecnológico implica una correcta gestión de los residuos procedentes de la cianurización en balsas impermeabilizadas para evitar pérdidas (Lara, 2003). Se estima que el cambio de tecnología reduciría la contaminación por mercurio en 0,2 Kg por tonelada tratada, pero no existen datos acerca de las afecciones que supone el mal uso del cianuro en las explotaciones artesanales (Lara, 2003).

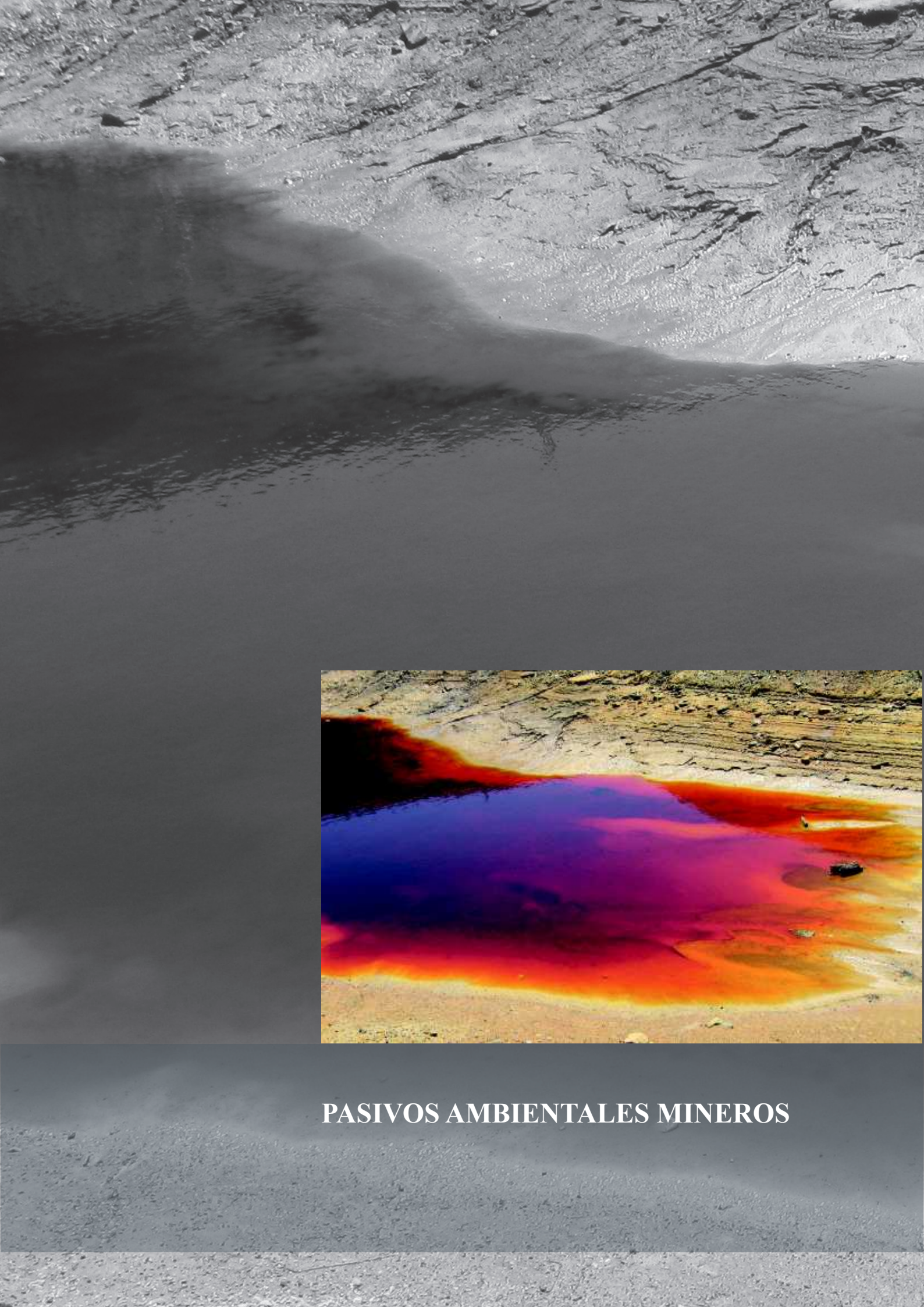
### **4.2.3 Fase de Abandono de la Explotación**

El carácter informal de este tipo de explotaciones dificulta enormemente el hablar de cierre de una explotación minera, por ello el término correcto al referiremos a minería artesanal es el de abandono de las labores. Para poder hablar de cierre, este debería ser tutelado por la administración como si se tratase de una operación minera de mayor envergadura; de esta forma se podría asegurar un cierre que cumpliera con un mínimo de requerimientos ambientales (Orche, 2003).

Siendo realistas, la programación de un cierre que es más recomendable para este tipo de minería informal es aquella que permita eliminar aquellos impactos más perjudiciales sobre el medio ambiente. Hay que considerar que en esta minería existe una serie de procesos que inciden muy negativamente en el medio biótico y natural cuya identificación es demasiado compleja debido a la informalidad de los trabajos que dificulta la identificación exacta de la fuente.

Una propuesta de cierre que ponga remedio a estos problemas será aquella que desarrolle al menos las medidas que se citan a continuación, teniendo siempre en cuenta las necesidades de las comunidades locales:

- Es necesario el realizar un cercado o vallado en torno a los puntos peligrosos de las labores mineras para evitar la caída del ganado o de las personas.
- Eliminación de los edificios fuera de uso, o cesión a la comunidad para fines sociales, si éstos presentan condiciones que sean adecuadas para estos fines.
- Reducción de los flujos de agua contaminantes por sellado de las labores.
- Recubrimiento con tierra de los desmontes y las balsas de lodos para minimizar la erosión eólica.
- Recogida de los desechos industriales, aceites y grasas.
- Relleno de las zonas colapsadas por subsidencia o cercado de las mismas.



**PASIVOS AMBIENTALES MINEROS**





## 5 PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

### 5.1 Introducción

Los pasivos mineros son el aspecto más negativo de la minería, realizada principalmente antes de la promulgación de las legislaciones ambientales. Los pasivos ambientales mineros comprenden las instalaciones abandonadas y los depósitos de residuos producidos por las operaciones mineras, que se hallan en estado de abandono o inactivas, y que generan una problemática en el entorno físico y social.

Los impactos ambientales de los pasivos (Tabla 5.1), especialmente sobre los recursos hídricos, están muy estudiados. Se trata principalmente de la generación de aguas ácidas y la contaminación por metales pesados, procedentes de escombreras, balsas de lodos, y efluentes de minas procedentes del rebote de las aguas una vez terminada la actividad. Uno de los mayores problemas que tienen estos pasivos ambientales radica en la imposibilidad de exigir la recuperación de los terrenos afectados a la compañía que realizó el laboreo del yacimiento.

**Tabla 5.1 Problemas Clave de los Pasivos Mineros**

Problemas Clave de los Pasivos Mineros	
Intrínsecos	<p>Problemas ambientales</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Contaminación de las aguas</li><li>• Calidad del aire</li><li>• Contaminación del suelo</li></ul> <p>Salud y seguridad publicas</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Caídas en galerías abandonadas</li><li>• Ahogos</li><li>• Gases venenosos</li><li>• Subsistencia</li></ul> <p>Rehabilitación y reutilización de los terrenos</p>
Problemática política	<p>Responsabilidades (morales y fiscales), normas técnicas</p> <p>Problemas de índole nacional</p> <p>Política y administración gubernamental</p>

Otro aspecto importante a tener muy en cuenta son los pasivos generados como consecuencia de la actividad minera artesanal. En estos casos, como ya se vio, dada la informalidad de estas actividades los problemas asociados son mayores. La modificación de las características hidrológicas e hidrogeológicas del terreno son muy importantes, ya que durante el periodo de operación no se controló la subsidencia y el minado del yacimiento se realizó de modo caótico, generando una intrincada red de cavidades y huecos, interconectada con la superficie a través de las fracturaciones generadas por el colapso de las galerías. Este hecho facilita la mezcla de las aguas superficiales y subterráneas en un menor tiempo, y genera una contaminación más rápida de los acuíferos.

El crecimiento urbano aumenta el peligro de los pasivos, al acercarse las zonas habitadas a estas zonas abandonadas.

Al igual que en otros trabajos de restauración de terrenos afectados por las actividades extractivas, los objetivos que se persiguen en el caso de estas estructuras de residuos son los siguientes:

- Estabilidad de las estructuras, a largo plazo.
- Prevención de la contaminación ambiental.
- Acondicionamiento para la recuperación y abandono.
- Puesta en uso productivo de los terrenos recuperados.
- Protección frente a los agentes erosivos a largo plazo.

Existen diversas alternativas para alcanzar estos objetivos, pero antes de pasar a ver algunas de ellas en detalle se van a mencionar de manera sucinta las medidas necesarias para proceder a la restauración de estas estructuras.

## **5.2 Estudio de los Pasivos Ambientales Mineros**

La fase clave para realizar la rehabilitación de un pasivo minero es la caracterización del mismo. Es necesario pues realizar una cartografía temática, que actualice además la cartografía de base, dado que la realidad actual distará bastante de la geomorfología original. Es necesario además realizar un inventario de las estructuras mineras y depósitos de residuos mineros. Esto será de gran utilidad a la hora de analizar el impacto ambiental que producen y el riesgo asociado a ellos.

Las etapas generales de los trabajos cartográficos y de inventariado de zonas mineras son:

1. Recopilación y análisis de la información existente del área a estudiar.
2. Definición de los niveles de información a cubrir. Preparación del trabajo de campo.
3. Realización del trabajo de campo. Topografía y toma de muestras.
4. Análisis de las muestras e interpretación.
5. Procesado de los datos de campo y laboratorio.
6. Síntesis de la información y representación de la misma.

Para la realización de este estudio el primer paso es caracterizar el área de estudio desde un punto de vista geográfico en el que no sólo se incluye la localización, sino las características fisiográficas, climáticas y mineralógicas. Las características de la red hidrográfica tienen una importancia vital, dado que posiblemente no se hayan tenido en cuenta a la hora de realizar los depósitos de estériles.

Una vez delimitado el ámbito geográfico en el que está enclavado el pasivo se debe delimitar topográficamente las diversas áreas que la componen y asociar cada una de ellas a los datos obtenidos de los análisis de campo.

Una vez caracterizado el pasivo minero, se puede proceder a la selección de opciones de remediación o restauración. A continuación se presentan algunas opciones para el tratamiento de aguas y de residuos sólidos.

### **5.3 Introducción a los Tratamientos Pasivos de Aguas de Mina**

La posibilidad de que los procesos naturales de depuración de aguas contaminadas pudieran resultar de utilidad al ser aplicados a aguas de mina ha dado lugar al desarrollo de una práctica denominada “tratamiento pasivo”. Estos sistemas de tratamiento pasivo, de acuerdo con la definición adoptada por el consorcio del proyecto de investigación PIRAMID (Passive In situ Remediation of Acidic Mine/Industry Drainage, 2000-2003) es “la mejora deliberada de la calidad del agua utilizando únicamente fuentes energéticas derivadas de procesos naturales (p.ej. fuerzas gravitacionales, energía metabólica microbiana, fotosíntesis, luz solar.) en sistemas que requieren únicamente un mantenimiento infrecuente para operar de una manera eficaz durante toda su vida útil” (Younger et al., 2002; PIRAMID, 2003).

Se hace necesario realizar esta definición para diferenciarlos de la única tecnología que se aplicaba al tratamiento de estas aguas hasta 1980, lo que en la actualidad se conoce como tratamientos activos. Un tratamiento activo no es otra cosa que la aplicación de la ingeniería de aguas residuales a las aguas de mina. La definición formal de tratamiento activo (Younger et al., 2002) pone de manifiesto las diferencias entre ambos tipos: “El tratamiento activo es la mejora de la calidad del agua mediante métodos que requieren de la participación de fuentes de energía artificiales y/o reactivos (bio)químicos”.

Las principales ventajas de un sistema activo radican en la ausencia de límites en la calidad de las soluciones a tratar y el control preciso del proceso, mientras que los sistemas pasivos, cuando son aplicables, suelen responder mejor a un análisis coste/beneficio desde el punto vista económico y medioambiental. De este modo, en las tecnologías pasivas se utilizan los procesos naturales químicos y biológicos que mejoran la calidad del agua. En teoría un tratamiento pasivo no necesita la adición continua de reactivos químicos y solo requiere de un mantenimiento infrecuente. Los costes de este tipo de tratamientos están asociados fundamentalmente a los relativos a la utilización de terreno y a las operaciones de construcción del sistema. Como término medio, se estima que la vida útil de un sistema pasivo es de entre 20 y 30 años (Watzlaf et al., 2004).

El objetivo de aplicar sistemas de tratamiento pasivo a soluciones contaminadas, cualquiera que sea su origen, es intensificar los procesos naturales de mejora de la calidad de las aguas, de forma que estos procesos tengan lugar dentro del sistema de tratamiento y no en las aguas receptoras. Estas tecnologías utilizan procesos de eliminación de contaminantes que son más lentos que los correspondientes a los utilizados en los sistemas de tratamiento convencional, por lo que, para lograr resultados similares, se requieren mayores tiempos de retención del agua de mina dentro del sistema y mayores superficies de tratamiento. Dos factores importantes que determinan si el objetivo se puede alcanzar con resultados satisfactorios, son la cinética de los procesos de elimina-

ción y/o transformación de contaminantes y el tiempo de retención del agua de mina en el sistema de tratamiento. A veces, en el caso particular de un emplazamiento minero, el tiempo de retención está limitado por la disponibilidad de terreno suficiente. Sin embargo, la cinética de los procesos de eliminación de contaminantes se puede modificar actuando sobre las condiciones medioambientales que existen dentro del sistema particular de tratamiento. Normalmente, el tamaño de un sistema de tratamiento se selecciona haciendo un balance del espacio disponible y los costes de construcción, así como del caudal y calidad del agua a tratar y la calidad requerida para el efluente. Todo ello se debe comparar con los costes de posibles tratamientos químicos alternativos.

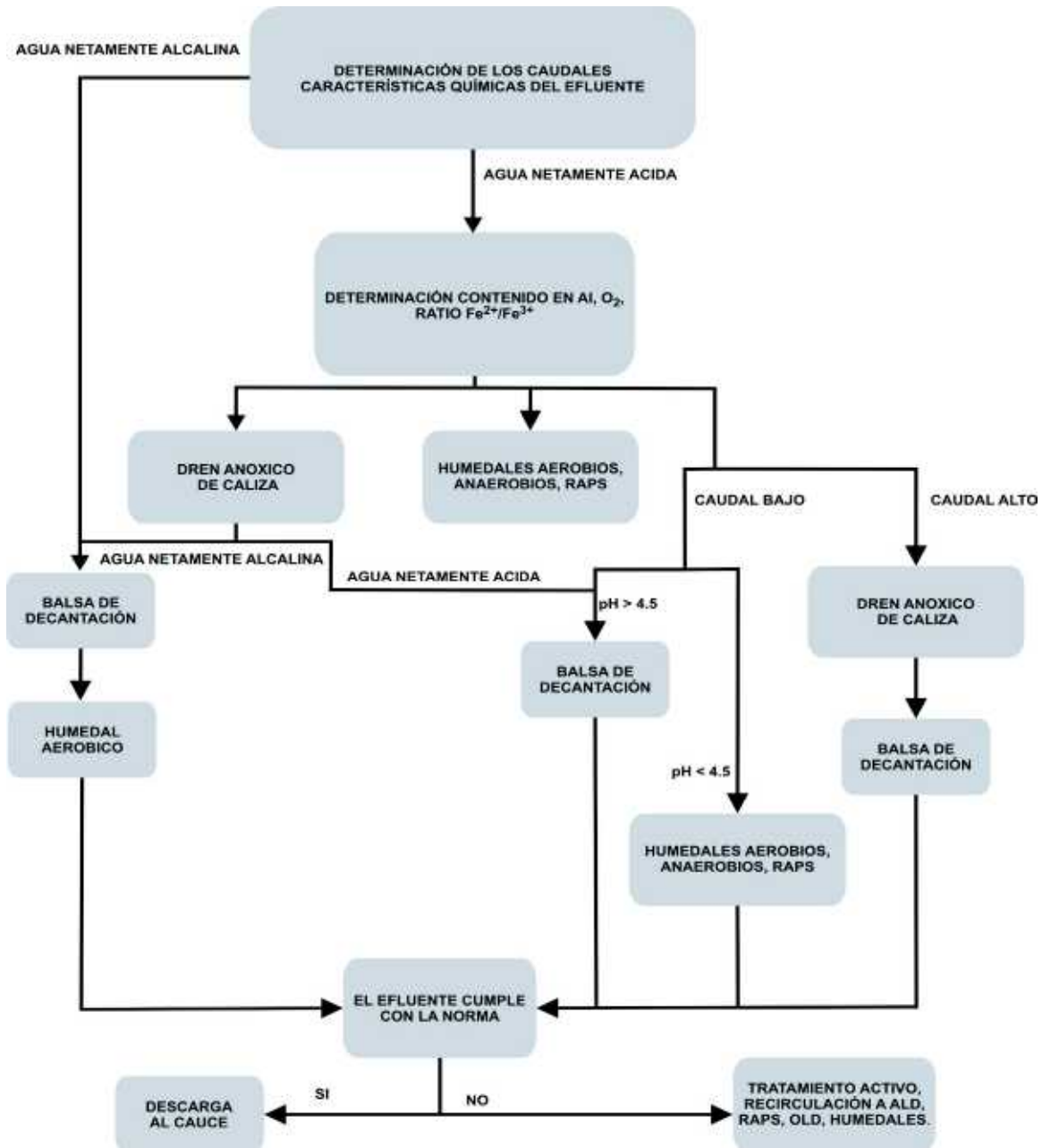


Figura 5.1 Esquema del diagrama de flujo para la Selección de Tratamientos Pasivos de Aguas Acidas. Basado en Younger et al, 2002 y Wolkersdorfer, 2006

Los procesos de eliminación de contaminantes se llevan a cabo en la práctica materializados en dis-

tintas formas tecnológicas. Actualmente, los diferentes sistemas que pueden ser catalogados como pasivos pueden ser agrupados en tres categorías diferentes (Younger et al., 2002):

- Sistemas pasivos tipo “humedal” (Wetland-type passive-systems).
- Sistemas Pasivos de Medio Inorgánico (IMPs, Inorganic Media Passive systems).
- Sistemas de flujo subsuperficial con actividad bacteriana sulfato-reductora (SFBs, Sub-surface Flow Bacterial reduction systems).

En los siguientes apartados se muestran las tecnologías existentes actualmente dentro de cada uno de estos sistemas. Se ha preferido citar las bases del sistema y mostrar un esquema del mismo, frente a una descripción detallada de cada una de las tecnologías, por considerarse que existe bibliografía abundante y específica sobre las metodologías de cálculo, dimensionamiento, tiempos de residencia, etc., a los que el lector interesado puede recurrir en caso de necesitar un mayor conocimiento del tema en cuestión. Por citar algunos de los documentos que están a disposición del público en formato digital, se puede acceder fácilmente a las guías generadas por los proyectos PIRAMID y ERMITE ; de entre la bibliografía existente destaca Younger, P., Banwart, S., Hedin, R., 2002, “*Mine Water, Hydrology, Pollution, Remediation*” y Wolkersdorfer, Ch., 2008. “*water Management at Abandoned Flooded Underground Mines*”.

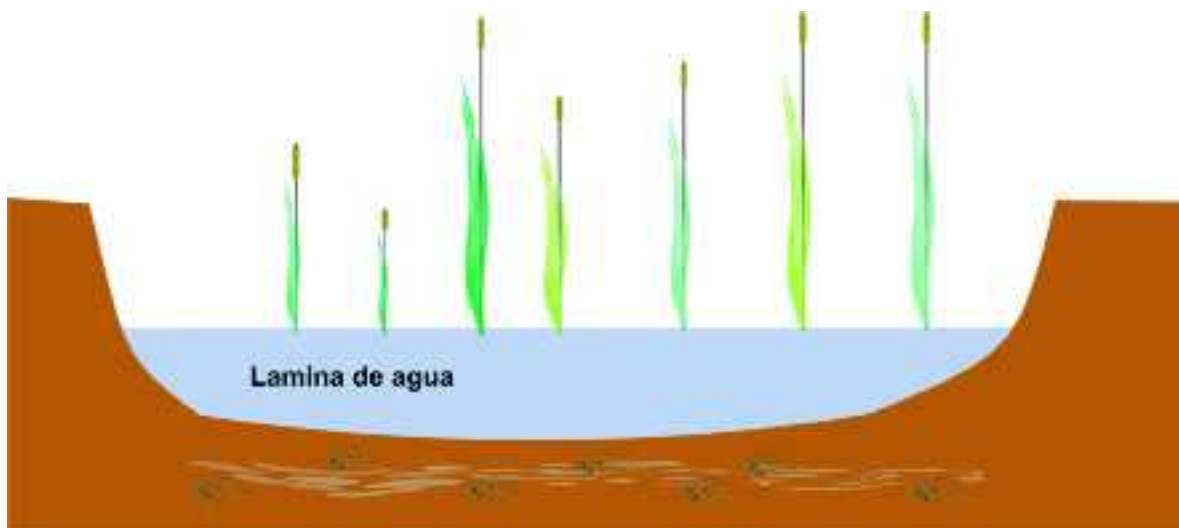
### **5.3.1 Sistemas Tipo “Humedal”**

#### **5.3.1.1 Balsas de Sedimentación**

Actualmente, varios organismos y autores recomiendan que una celda de sedimentación sea el primer elemento de cualquier sistema pasivo para el tratamiento de flujos superficiales, debido a su simplicidad y su potencial para eliminar sólidos inertes en suspensión (es decir, eliminar o reducir la turbidez de la solución a tratar): es evidente que resultará mucho más sencillo retirar el sedimento acumulado de una celda de este tipo que de un humedal propiamente dicho, con lo que además se logra prolongar de forma significativa la vida útil del mismo. Muchas de las soluciones susceptibles de ser sometidas a un tratamiento pasivo llevarán en suspensión finas partículas (por ejemplo, de suelo) de naturaleza inerte, como pueden ser las arcillas o el cuarzo, que quedan satisfactoriamente retenidas en una balsa de sedimentación.

#### **5.3.1.2 Humedales Aerobios (Aerobic Wetlands)**

Los humedales aerobios son actualmente una tecnología aceptada y establecida para la eliminación de Fe y Mn (también Zn en forma de carbonato), en aguas netamente alcalinas (alcalinidad > acidez). El factor común de estas aplicaciones exitosas de los humedales aerobios es el predominio de los procesos de oxidación e hidrólisis, junto con varios mecanismos de sedimentación. El resultado de los procesos de oxidación y de hidrólisis es una producción neta de acidez en forma de protones, por lo que este tipo de sistemas solamente es apto para soluciones netamente alcalinas (en el caso de tratar un agua ácida, el pH caería hasta un valor, generalmente inferior a 5, en el que la mayoría de los metales son solubles). Para el tratamiento de un agua ácida por ésta vía, es necesario un pre-tratamiento para neutralización de la acidez.



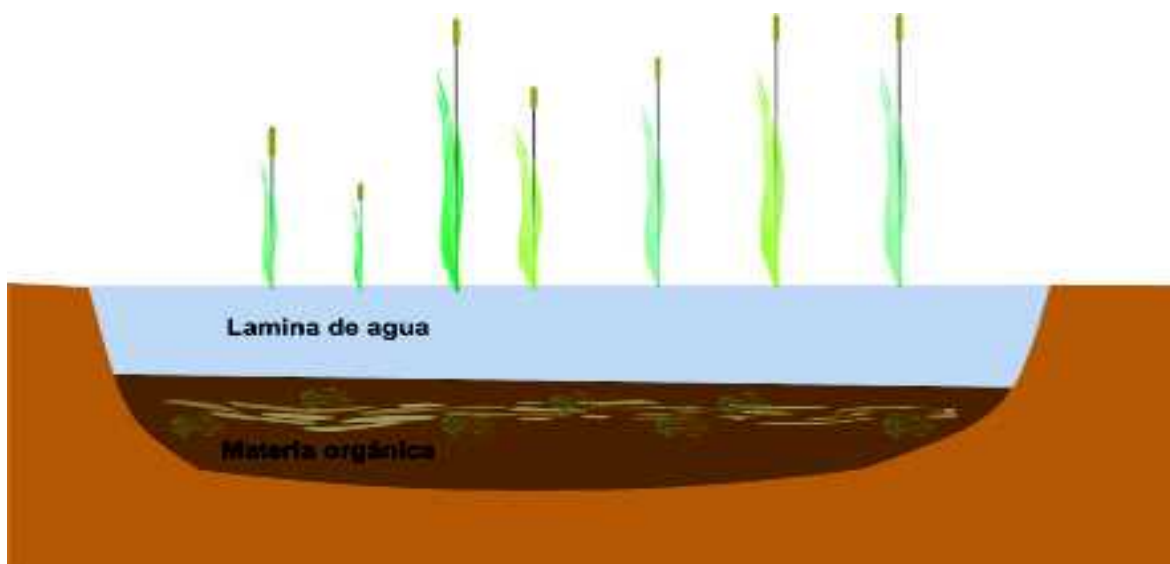
*Figura 5.2 Esquema de un Humedal Aerobio*

Básicamente, un humedal aerobio es una celda rellena con una somera capa de algún sustrato (generalmente orgánico, aunque puede ser de otro tipo) sobre el cual se plantan especies vegetales que resulten resistentes a las condiciones de la solución a tratar y que tengan un papel activo en el proceso depurador (Younger et al., 2002). Las especies vegetales, además de proporcionar condiciones favorables para la sedimentación de metales, provocan una circulación más sinuosa (lenta) del flujo, alterando de la misma manera el perfil de velocidad del flujo en profundidad.

### **5.3.1.3 Humedales de Sustrato Orgánico (Compost Wetlands)**

Los humedales aerobios fueron las primeras tecnologías pasivas que se emplearon para el tratamiento de aguas de mina. Pronto se hizo patente el problema que estos sistemas, al ser aplicados a un agua netamente ácida, provocaban un nuevo descenso del pH en las mismas, debido a la liberación de protones durante el hidrólisis del  $\text{Fe}^{+3}$  y del  $\text{Al}^{+3}$ . Con el desarrollo de la tecnología, se fue contrastando que este efecto de disminución del pH era mucho menos marcado en aquellos sistemas en los que se habían añadido al sustrato algunas capas de sustrato orgánico (compost) para promover el crecimiento de los vegetales.

Así, se pensó en la idoneidad de los humedales de sustrato orgánico como alternativa a los humedales aerobios. Aparentemente, tienen el mismo aspecto que éstos: esto es, una celda con una capa de sustrato en el que pueden ser plantadas especies vegetales. La principal diferencia es la naturaleza del sustrato, al incorporar los humedales de sustrato orgánico, como su propio nombre indica, capas de material rico en materia orgánica, favoreciendo así la actividad bacteriana responsable de la reducción de los sulfatos. Este proceso es responsable del consumo de acidez, de la generación de alcalinidad en forma de bicarbonato y de parte de la eliminación de Fe y Zn en forma de sulfuros y del Mn en forma de óxido o carbonato. Además, la eliminación del Al en forma de hidróxido se ve favorecida por la subida del pH de la solución a tratar.



*Figura 5.3 Esquema de un Humedal Anaerobio o de Sustrato Orgánico*

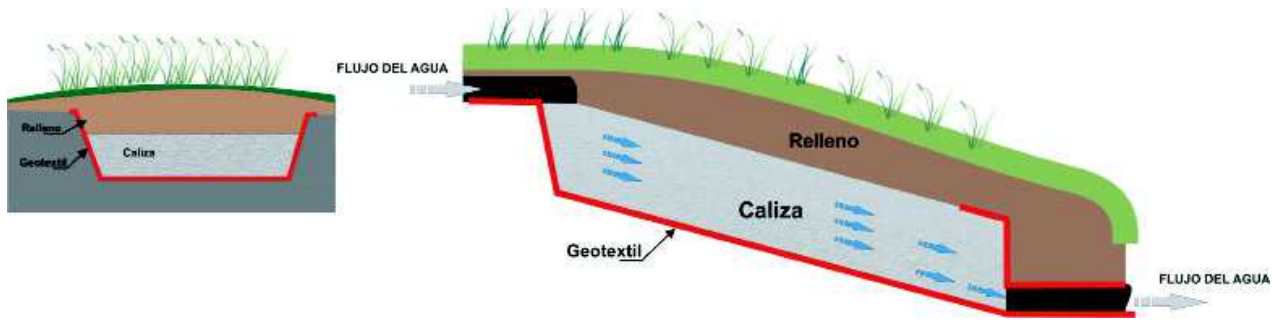
### 5.3.2 Los Sistemas Pasivos de Medio Inorgánico (IMPs)

Se trata de sistemas conceptualmente muy simples, se basan en realizar cambios en la composición química de la solución que tratan (eliminación de contaminantes) mediante la precipitación y/o disolución de algunas especies minerales. Las tecnologías más comunes son aquellas en las que el mecanismo de eliminación de contaminantes se basa en la disolución de la caliza (ALDs y OLDs), proceso mediante el cual se logra aumentar el pH, neutralizar la acidez y añadir alcalinidad (principalmente en forma de iones bicarbonato) a la solución. Las principales características que hacen de la caliza un material ideal para ser empleada como reactivo base para promocionar los procesos anteriores, son que es barata, inocua y se encuentra disponible en la gran mayoría de los distritos mineros, lo cual es un factor clave cuando el sistema se aplica a aguas de mina. Por contraposición, la caliza nunca ha sido muy usada en tratamientos activos, debido principalmente a su tendencia a ser recubierta superficialmente con hidróxidos metálicos sólidos perdiendo reactividad, y por tener una lenta cinética en su proceso de disolución.

#### 5.3.2.1 Canales Anóxicos de Caliza (ALDs, Anoxic Limestone Drains)

Los canales de caliza son una aplicación directa de lo comentado anteriormente: se trata de un canal anóxico relleno de fragmentos de caliza de tamaño de grano tipo grava, generalmente de un diámetro de entre 50 y 75 mm (PIRAMID, 2003) por el que se hace pasar la solución a tratar. De esta forma se logra, mediante la disolución de la caliza, generar alcalinidad y neutralizar la acidez protónica, mediante la acción combinada de los iones carbonato y bicarbonato (Watzlaf et al., 2004). También se han mostrado como generadores de alcalinidad diversos compuestos en forma iónica silicato, carbonato y bicarbonato, borato, algunos ligantes orgánicos, fosfato e ión amonio (Hem et al, 2005). En el interior del canal se deben mantener condiciones reductoras, lo que se logra enterrando el canal, de forma que los metales polivalentes, sobre todo Fe y Mn, se mantengan en su forma reducida, evitándose así la formación de hidróxidos y su consiguiente precipitación.

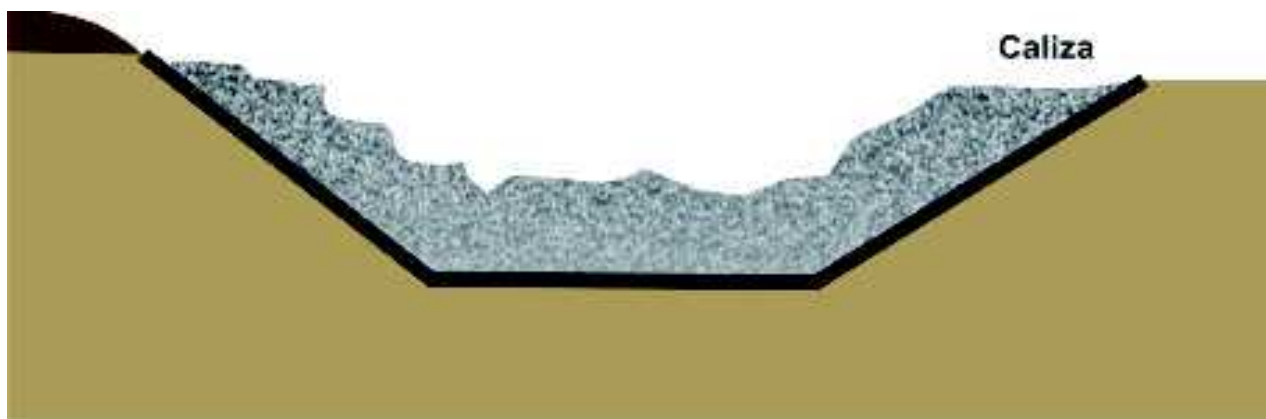




*Figura 5.4 Esquema de un ALD*

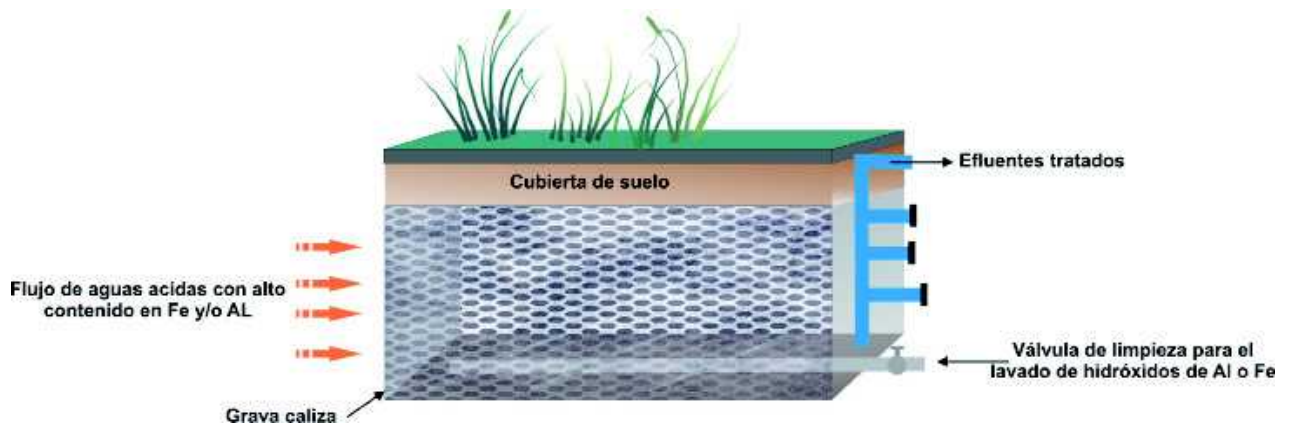
### 5.3.2.2 Drenes Calizos en Condiciones Oxidantes (OLDs, Oxic Limestone Drain) y Reactores Aerobios (OCLRs, Open Channel Limestone Reactors)

En muchos casos los sistemas ALDs no son viables debido a las limitaciones de operación que poseen en cuanto al contenido del influente en oxígeno disuelto,  $Al^{+3}$  y  $Fe^{+3}$ . Una solución intermedia entre los RAPS que se explican más abajo, y que comparte la simplicidad del ALD siendo apto para operar en condiciones oxidantes, son los OLDs (Oxic Limestone Drain). El mecanismo en el que se basa esta tecnología es el hecho de que, manteniendo un flujo rápido de la solución en el interior del sistema, los hidróxidos de Fe y Al, formados se mantienen en suspensión, con lo que abandonan el lecho sin quedar retenidos en el mismo, evitando así su colmatación.



*Figura 5.5 Esquema de un OLD*

Se puede optar por usar canales abiertos de caliza (OCLRs, Open Channel Limestone Reactors) en determinadas circunstancias especiales, como pueden ser los casos en los que el tratamiento pasivo deba ser llevado a cabo en áreas rocosas, donde la excavación de un canal anaerobio resultaría antieconómica o en áreas inaccesibles, como arroyos en las partes altas de las cuencas que pudieran estar afectados por un drenaje ácido. En estos canales abiertos predominarán las condiciones oxidantes por lo que se produce la precipitación de hidróxidos y por tanto la disolución de la caliza se ve mermada, pero aún se produce de forma significativa (Álvarez, 2005).



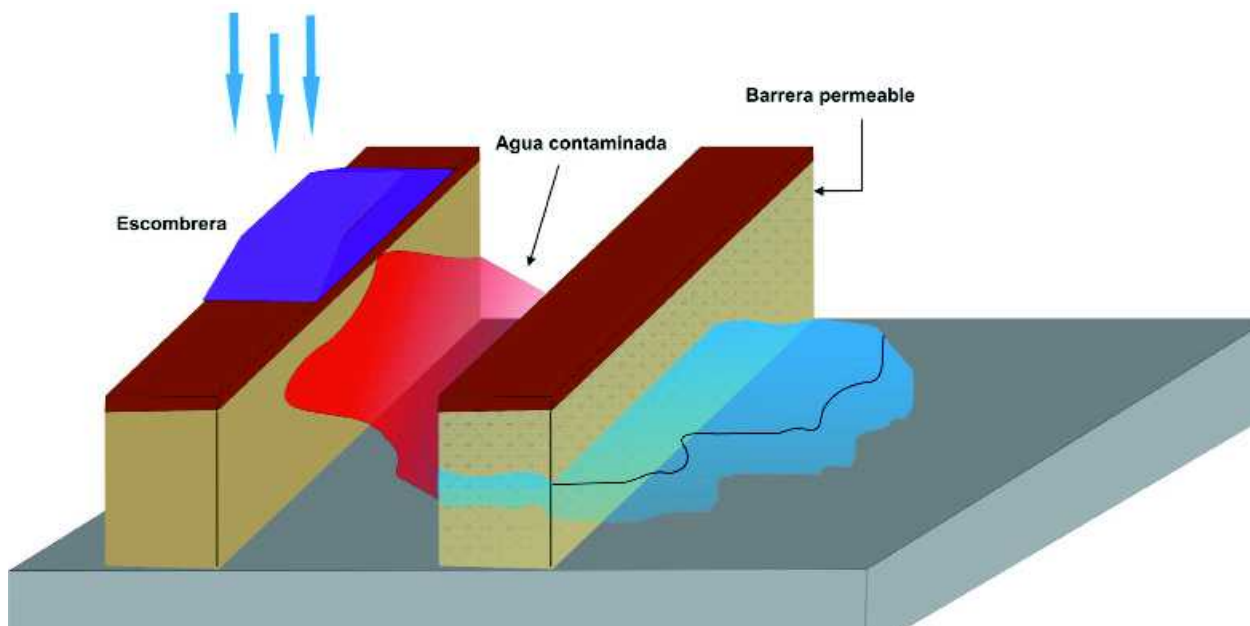
*Figura 5.6 Esquema de un OLC*

### 5.3.3 Sistemas de Flujo Subsuperficial con Actividad Bacteriana Sulfatoreductora

Los sistemas de flujo sub-superficial con actividad bacteriana sulfato-reductora se subdividen en dos categorías:

#### 5.3.3.1 Barreras Reactivas Permeables (PRB, Permeable Reactive Barrier)

El concepto de barrera permeable reactiva es simple, se trata de un medio permeable constituido por un material geoquímicamente apropiado que se sitúa transversalmente al flujo de agua subterránea que se pretende tratar. Al atravesar el flujo la barrera, tienen lugar las reacciones biológicas y químicas que se intentan promocionar para la eliminación de los contaminantes. Así, tras atravesar la barrera, la calidad del agua es mejorada en gran medida (Gavaskar et al, 1998; Younger et al, 2003; Komnitsas et al, 2006).



*Figura 5.7 Esquema de una Barrera Permeable*

### 5.3.3.2 Reactores Anaerobios para el Tratamiento de Aguas de Mina Superficiales

Esta tecnología ha sido estudiada durante la última década para la eliminación eficaz de metales y sulfatos en las aguas de mina. Se pensó en reactores anaerobios debido a que si bien los sistemas tipo humedal eliminan bien los metales que hay en solución, no ocurre lo mismo con los sulfatos.

### 5.3.4 Sistemas Reductores y Generadores de Alcalinidad (RAPS, Reducing and Alkalinity Producing Systems)

En la bibliografía, esta tecnología se denomina como sistemas de producción sucesiva de alcalinidad (Sucessive alkalinity producing systems, SAPS), sistemas de producción de alcalinidad (alkalinity producing systems, APS) o sistemas de reducción y producción de alcalinidad (Reducing and Alkalinity Producing Systems, RAPS) (Watzlaf y Hyman, 1995. Watzlaf, 1998). En un principio, estos sistemas nacieron como una alternativa a los sistemas ALD, cuyas aplicaciones se veían restringidas a efluentes con bajos contenidos de oxígeno disuelto, de  $\text{Fe}^{+3}$  y de  $\text{Al}^{+3}$ . Un sistema RAPS propiamente dicho consiste en un ALD recubierto por una capa de compost, cuya función es reducir los cationes de  $\text{Fe}^{+3}$  a  $\text{Fe}^{+2}$  y reducir el contenido en oxígeno disuelto por medio de actividad bacteriana (Watzlaf et al., 2004) antes que la solución a tratar entre en contacto con las partículas de caliza. Actualmente se usa un sustrato mixto, compuesto por una mezcla de caliza y materia orgánica en lugar de dos capas.

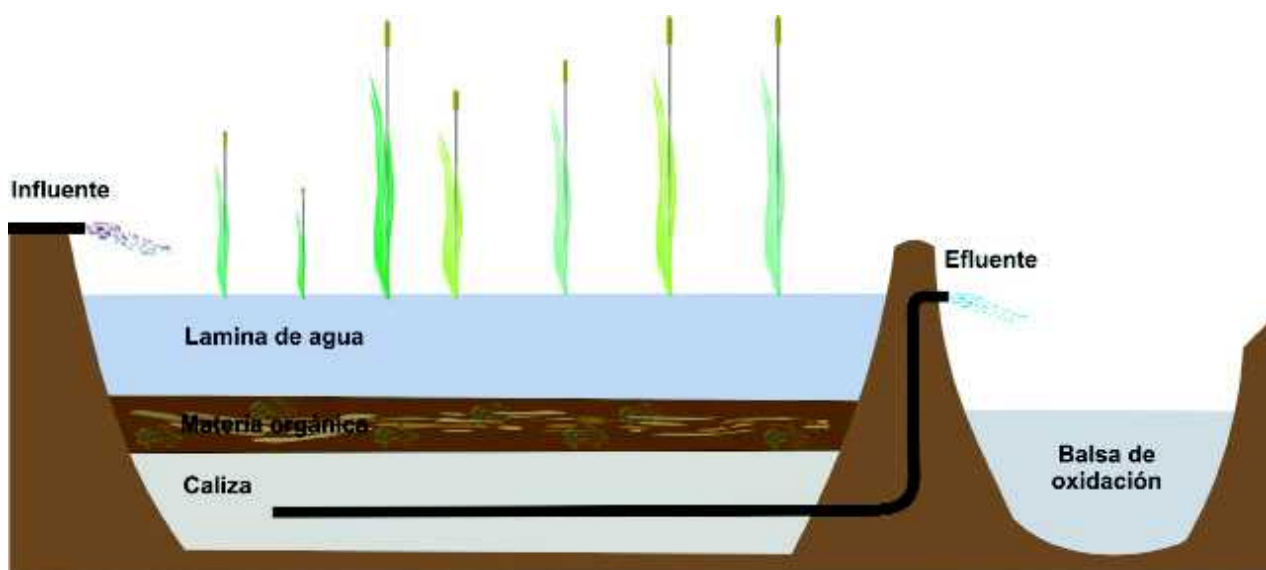


Figura 5.8 Esquema del Sistema RAPS

Estos sistemas generalmente funcionan con un flujo vertical: de este modo, como la totalidad de la solución es obligada a atravesar los dos sustratos, el sistema suele ser mucho más eficiente que los humedales de sustrato orgánico, o bien requiere mucho menos espacio para lograr el mismo nivel de tratamiento, en términos de mejora de la calidad de la solución objeto (Younger et al., 2002).

## 5.4 Técnicas de Remediación de Suelos Contaminados y Residuos Sólidos

Actualmente existe un abanico de aproximadamente 70 tecnologías disponibles para la extracción, inmovilización y degradación de los contaminantes asociados con la actividad minera y las plantas

de tratamiento de minerales (Weiersbye, 2007). Estas tecnologías pueden agruparse en categorías física, química, termal y biológica con aplicabilidad a los medios de suelos, desechos, sedimentos, y aguas superficiales y subterráneas.

Aunque las buenas prácticas ecológicas son universales en su aplicabilidad a la rehabilitación de suelos degradados y balsas de lodos (Perrow y Davy, 2002), el tipo y grado de contaminación, y el medio (agua subterránea, agua superficial, suelo, sedimento o desechos) determinarán la aplicabilidad de las tecnologías específicas. Los contaminantes más típicos que se pueden tratar incluyen los solventes clorados, los contaminantes orgánicos persistentes, los hidrocarburos, los explosivos, el cianuro, los metales, los metaloides, las sustancias radioactivas y las partículas de asbesto y de cuarzo. A continuación se enumeran las opciones más usadas para la remediación de Suelos Contaminados y Residuos Sólidos, y sus costes típicos.

**Tabla 5.2 Costos de Operación Estimados para las Tecnologías Aplicadas para Remediación de Suelos Contaminados por Metales Pesados. Basado en Evanco y Dezombak, 1997, Schnoor, 1997 y Glass 1999.**

Tipo de Tratamiento	Coste (US\$/T)
Bioremediación In Situ	30 – 150
Electrocinética	20 – 200
Estabilización	240 – 340
Extracción de suelo / lixiviación	250 – 500
Fijación	90 – 200
Fitoestabilización	0,02 – 1
Fitoextracción	5 – 40
Lavado de suelos	80 – 200
Pirometalurgia	250 – 550
Tratamiento Químico	100 – 500
Vertido	100 – 500
Vitrificación	75 – 875
Contención/Encapsulado	5 – 90

Las metodologías físicas incluyen el lavado o lixiviación de suelos y el tratamiento o disposición final del lixiviado; la vitrificación del suelo para producir vidrio estabilizado lo que es menos susceptible a ser lixiviado; la estabilización con cemento, cal, arcilla y polímeros para reducir la permeabilidad y reducir la tasa de lixiviación. La excavación y deposición en un relleno seguro es el método más común pero también el más caro. Se suma al costo del flete, la deposición en otro lugar, lo que crea otro sitio que posiblemente requerirá gastos adicionales para contener el material contaminado.

## **5.5 Técnicas Emergentes para la Gestión de Pasivos Mineros**

### **5.5.1 Tratamiento Activo de Aguas Ácidas de Mina para Otros Usos Comerciales**

En zonas muy áridas, donde el valor de agua limpia es muy alto, puede ser rentable depurar aguas ácidas de mina para aprovechar el recurso en otras operaciones, sobre todo si el caudal es alto y las concentraciones de contaminantes son bajas (Loredo et al, 2009c). Por ejemplo, en España en la mina abandonada de Tharsis es rentable de tratar las aguas ácidas para regar plantaciones de naranjos.

### **5.5.2 Reciclaje de estériles de mina y balsas de lodos**

Una alternativa para la eliminación de escombreras y balsas de lodos es aprovechar los residuos para obtener los minerales residuales contenidos todavía en ellos, usando técnicas que mejoren la recuperación o tecnologías emergentes, o el aprovechamiento de los estériles como materiales de construcción. Un ejemplo puede ser el manganeso de algunas escombreras que se ha utilizado en la agricultura como enmienda para los suelos, fundente para vidrio, cerámica, etc. (Verlaan y Wiltshire, 2000). Las mineralizaciones marginales de bajo grado también se pueden extraer con especies de plantas adecuadas que extraer los metales específicamente. Este proceso se ha definido como fitominería, y es la base de la fitoremediación ya que no sólo recupera los metales de los desechos, sino que se usa también para la remediación de entornos contaminados.

### **5.5.3 Fitoremediación**

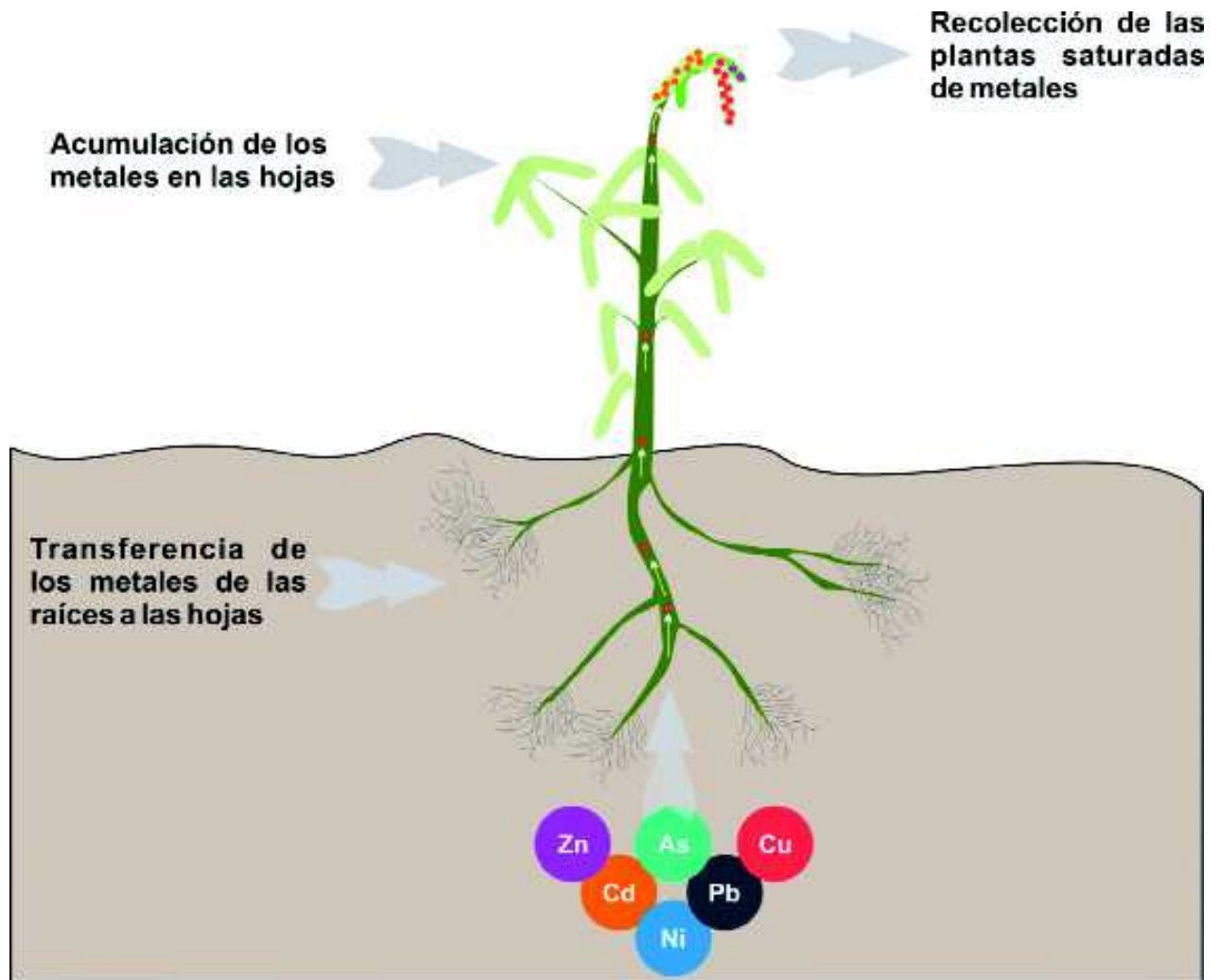
Como se ha visto en el apartado anterior, las técnicas tradicionales de remediación de escombreras y balsas de residuos mineros suelen ser caras debido a que implican una serie de procesos como la excavación, protección del perímetro, estabilización química, encapsulado, etc., que hacen que el monto total sea del orden de 130.000 a 1.600.000 US\$/Acre (Berti y Cunningham, 2000 en Mendez, Glenn y Maier, 2007). Las técnicas emergentes de fitoremediación por el contrario presentan unos costos mucho menores del orden de 60.000 a 300.000 US\$/Acre (Wolfe y Bjornstand, 2002 en Mendez, Glenn y Maier, 2007), pero tienen el inconveniente de ser procesos a largo plazo.

El término fitoremediación fue introducido por primera vez en 1991 para definir el conjunto de tecnologías basado en el uso de plantas, algas, biomásas y microorganismos para mejorar la calidad de un medio ambiental. Es una práctica que data de tiempos pre-históricos, originalmente usada para mejorar la calidad de los suelos agrícolas con nutrientes naturales o para convertir zonas de pantanos en áreas útiles, por medio de plantas y árboles con alta demanda de agua. Hoy en día en las zonas desérticas costeras de Chile y Perú, bosques de eucaliptos están plantados para absorber

y evapotranspirar el agua utilizada para el transporte de concentrados de mineral (mineroductos) desde las minas ubicadas en la sierra hasta los puertos ubicados en la costa.

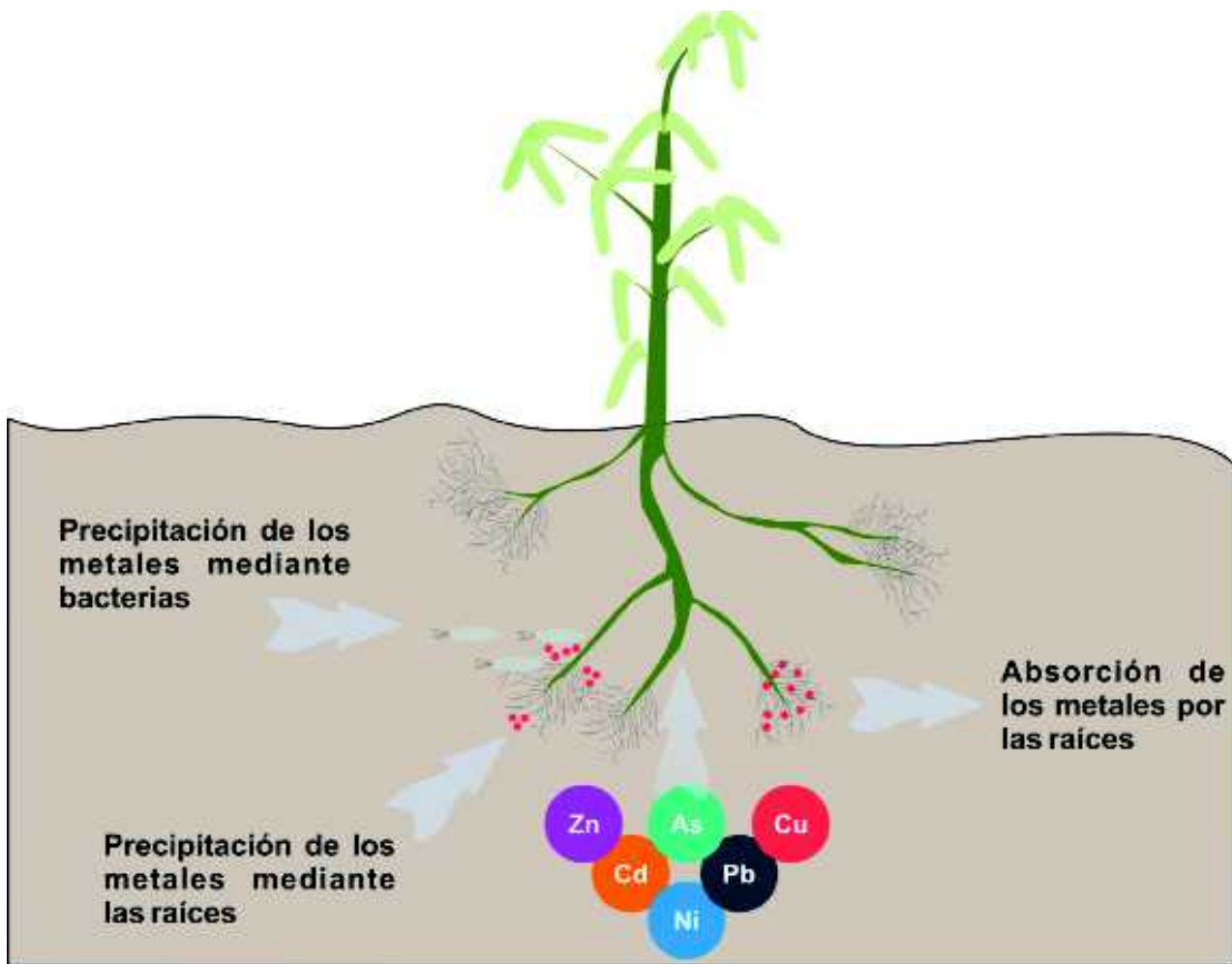
Son varias las técnicas aplicables a la mejora de la calidad del suelo mediante el uso de plantas:

- La fitoextracción, que puede encontrarse en la literatura científica también como fitoacumulación, fitosequestro o fitoabsorción. Se basa en la absorción de los contaminantes por las raíces de la planta, que los moviliza hacia las partes aéreas donde se fijan. La eliminación de los contaminantes exige la recolección de las plantas (EPA, 2000; 2001;).



*Figura 5.9 Esquema del Proceso de Fitoextracción*

- La fitoestabilización aparece también en la literatura como inactivación in-situ o fitoimmobilización. Es un proceso más complejo, ya que exige la inmovilización de los contaminantes mediante la modificación de las propiedades físico-químicas y/o biológicas del suelo. La variedad de medios para reducir la movilidad de los contaminantes es muy amplia (EPA, 2000; 2001; Mendez y Maier, 2008).



*Figura 5.10 Esquema de los Procesos de Fitoestabilización. Modificada de Mendez y Maier, 2008*

- El sistema de cubierta vegetal, del que hemos hablado con más detalle anteriormente (ver 3.4.10), está considerado por algunos autores como una técnica de fitoremediación (Cortes Lucas, 2006). Está basado en la generación de una cubierta vegetal que no dependa del factor humano para ser viable, y minimice los impactos ambientales de los contaminantes presentes en el horizonte recubierto.

El uso de plantas perennes y microorganismos tolerantes a las condiciones climáticas son importantes para la estabilización de los depósitos de estériles y balsas de lodos, especialmente las comunidades de plantas que se regeneran a través de la producción y distribución de semillas (Mendez y Maier, 2008; Weiersbye et al., 2006). Se pueden emplear plantas, algas y microorganismos, que son tolerantes a condiciones tóxicas para degradar, transformar y capturar contaminantes, incluyendo la movilización de metales pesados desde suelos y aguas. Los métodos fitotécnicos son ampliamente aceptados en el manejo de desechos (Sutherson, 2002).

#### **5.5.4 Uso de Tecnosoles para la rehabilitación de espacios degradados**

Los Tecnosoles (FAO, 2007) son suelos creados artificialmente con cantidades variables de materiales. Constituyen un nuevo tipo de suelos en la clasificación de la FAO y comprenden suelos cuyas

propiedades están definidas por su origen técnico. Incluyen suelos generados a partir de desechos (rellenos, lodos, escorias, escombros o desechos de minería y cenizas), pavimentos con sus materiales subyacentes no consolidados, suelos con geomembranas y suelos construidos por materiales hechos por el hombre. Contienen una variedad significativa de materiales, principalmente desechos de otras industrias. Cuando se habla de Tecnosoles frecuentemente se hace referencia a suelos urbanos o de minas. Se reconocen en el nuevo sistema ruso de clasificación de suelos como Formaciones Tecnogénicas Superficiales.

Los tecnosuelos suelen usarse para la recuperación de suelos contaminados entornos urbanos e industriales contaminados y/o degradados.

Como apuntan varios autores (Macias et al., 2009a, Macias et al., 2009b, Asensio et al., 2008), estos suelos pueden utilizarse en el tratamiento de pasivos mineros y el cierre de minas, dado que pueden constituir un complemento de la tierra vegetal apilada previamente en actuaciones de restauración de los espacios mineros. También pueden ser usados como sustitutivo de la turba y tierra vegetal en labores de sellado o recuperación de suelos afectados por las actividades mineras.

Presentan además la ventaja de que se pueden generar suelos para cultivos forestales de alta intensidad (eucaliptales, pináceas, etc.) para generar bosques de producción maderera. Incluso pueden proporcionar suelos para cultivos forzados con alta demanda de nutrientes, generando después de la restauración una fuente de recursos para las comunidades locales o la administración de modo que se revertiría el pasivo ambiental en un activo ambiental para la comunidad.

En resumen los Tecnosoles pueden generar beneficios ambientales al recuperar suelos degradados y/o contaminados. Por otro lado se obtiene la minimización de los residuos a llevar a vertedero o planta de tratamiento. Una ventaja de estos suelos artificiales es que se integran rápidamente en los ciclos biogeoquímicos, además de ahorrar recursos naturales como la “tierra vegetal” o la turba en labores de recuperación de suelos, sellado de vertederos, etc., con lo que se reducen los costes de gestión de residuos minimizando gastos energéticos y almacenamiento de residuos.

Por otro lado incrementan el aprovechamiento de los nutrientes (N, P, K, Mg, Ca, etc.) existentes en los residuos incorporándolos a la cadena trófica y a los suelos con reducción de los costes de fertilizantes y enmendantes, y a su vez incrementan el secuestro de carbono en suelos y en la biomasa que sostienen (Macias et al., 2009a).

Desde el punto de vista hidrológico colaboran en mejorar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas al recuperar las funciones de tamponización, filtro y depuración propias de los suelos e incrementar la resistencia a los riesgos derivados de la contaminación (Macias et al., 2009a, Macias et al., 2009b).







**CONCLUSIONES**



## 6 CONCLUSIONES

### **Perspectivas claves: recursos naturales y cuencas**

El manejo sostenible de la minería precisa de una perspectiva amplia de recursos naturales en su totalidad. Para ello hay que tener en cuenta que aunque la forma de muchos yacimientos de minerales no sigue la forma de la superficie de la tierra, los demás recursos naturales (agua, suelos, plantas etc) suelen encontrarse distribuidos según los rasgos paisajísticos mayores; y las cuencas fluviales son el rasgo paisajístico clave en la gestión del agua. Al igual que los yacimientos, las aguas subterráneas que se encuentran dentro de labores mineras pueden existir en acuíferos que traspasan los bordes naturales de cuencas superficiales. Pero en su estado natural, las aguas subterráneas fluyen hacia valles naturales, donde se descargan a la superficie mediante manantiales, o por los lechos de los ríos mismos. Dado los cambios grandes en la forma del terreno causados por la minería – especialmente minería al cielo abierto – y dadas también las perturbaciones de aguas subterráneas provocados por muchas minas (tanto subterráneas como a cielo abierto), la armonización de la producción minera con el manejo integral de los otros recursos naturales ruega que se adopte una perspectiva de cuencas como el marco de referencia básico para la gestión de agua en operaciones mineras. Esta exigencia es cada vez más importante en zonas áridas y semiáridas, donde los recursos naturales suelen ser restringidos frente a las posibles demandas sociales.

En la mayoría de casos, el manejo de terrenos para diversos usos (forestales, agrícolas) se realiza mediante una perspectiva de cuencas, reflejando las pautas habituales de colonización de terrenos, valle por valle. Además, el manejo de agua se realiza más que todo por cuencas, aprovechando la ayuda de gravedad en la distribución del agua hacia abajo. Por eso, la adopción de la cuenca como el marco de referencia básico para gestión tiene la ventaja de orientar los mecanismos empresariales de tal forma que se facilita el diálogo multi-sectorial. Con canales de diálogo optimizados así, es cada vez más fácil demostrar a los otros intereses en cada cuenca que la empresa minera actúa según los principios de transparencia. Esto es un prerrequisito para obtener y guardar la ‘licencia social para operar’.

### **Agua: eje principal de la contribución minera al desarrollo sostenible**

Experiencias en todos los continentes demuestran que el agua es el vector más importante, y el receptor más común, de los impactos ambientales de la minería. Este hecho se ve cada vez más claro en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, son pocas las empresas mineras que mantienen un enfoque consistente en asuntos hídricos. a nivel operacional el agua se considera todavía una molestia nomás. Así, en muchos casos, la postura de la industria minera es reactiva frente al establecimiento de normas reguladoras para cuencas, cediendo la iniciativa a otros grupos de interés en las mismas. Lamentablemente, esta tendencia ha dejado crecer prácticas técnicas que están en contra a razón (y en contra a los intereses de la minería misma), tal como la utilización de concentraciones en vez de ‘cargas’ como el límite regulativo para metales en aguas ambientales. En cambio, dado que las operaciones mineras cuentan con alta pericia en geología, hidrogeología, establecimiento de suelos y crecimiento de plantas, aquellas empresas mineras que adopten una postura proactiva en cuanto a manejo de cuencas tienen la posibilidad de convertirse en compañías de recursos naturales en

su totalidad. En tal caso, la empresa no se fija solamente en evitar impactos y riesgos negativos: la empresa podría convertirse en el líder de desarrollo positivo en cada cuenca, abasteciendo agua adecuada para las diversas demandas por otros sectores, aprovechando el conocimiento privilegiado de aguas y de la subestructura de la cuenca proveniente de las experiencias de exploración y explotación minera.



## BIBLIOGRAFIA



## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, R., 2005.** Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de Soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro. Tesis doctoral.
- Asensio, V., Cerqueira, B., Andrade, M.L., Alonso, F. y Fernandez, E., 2008.** Efecto del Tratamiento con Tecnosoles en la Recuperación de Escombreras de Mina Ricas en Sulfuros Metálicos en Macla N°.10 Comunicaciones del Workshop: “Problemática Postminera derivada de la explotación de Sulfuros Polimetálicos”, Sevilla 17-19 de Noviembre de 2008.
- Asociación Minera de Canadá , 1998.** A Guide to the Management of Tailings Facilities.
- Ayala Carcedo, F.J., 1986.** Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. IGME .
- Ayala Carcedo, F.J., 2004.** Manual de Restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. IGME.
- Ayyub, B.M., 2003.** Risk Analysis in Engineering and Economics. Taylor & Francis (Chapman & Hall/CRC).
- Banks D., 2004.** Geochemical processes controlling minewater pollution, Proc. 2nd IMAGE-TRAIN Advanced Study Course, Groundwater Management in Mining Areas, Pécs, Hungary, 23–27 June 2003, Conference Papers CP-035, Umweltbundesamt, Viena,
- Barettino D., Obis, J. y Espí, J.A. (eds) 2005.** La industria extractiva no energética y el medio ambiente en el marco del desarrollo sostenible. Publicaciones del instituto Geológico y Minero de España. Serie medio Ambiente, 6.
- Bennet, J.W., Comarmond, M.J. y Jeffery, J.J., 2000.** Comparison of Oxidation Rates of Sulfidic Mine Wastes Measured in the Laboratory and Field. ACMER .
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jr., Donigian, A.S., Jr., and Johanson, R.C., 1997.** Hydrological Simulation Program--Fortran, User’s manual for version 11: U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, Ga., EPA/600/R-97/080.
- Blight, G. E. y Amponsah-Dacosta, F., 2004.** Erosional stability of tailings dam slopes, En: Ground Water Bioengineering for Erosion Control. Barker, D. et al (eds), Science Publishers Inc, USA .
- Blight, G. E., 1991.** Erosion and anti-erosion measures for abandoned gold tailings dams. Reclamation 2000: Technologies for Success. En 8º National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, Durango, USA.
- Blight, G.E., 1989.** Erosion losses from the surfaces of gold-tailings dams. journal of the south african institute of mining and metallurgy, vol. 89, nº. 1.
- Blight, G.E., 2007.** Wind erosion of tailings dams and mitigation of the dust nuisance. journal of the south african institute of mining and metallurgy, vol. 107, nº. 2,
- Botín, J.A., 2009a.** Integración de la sostenibilidad en los niveles operacionales de la empresa minera. Conferencia Internacional sobre Minería Sostenible. Santiago de Compostela. 15,16,17 de Abril
- Botin, J.A., 2009b.** Sustainable Management of Mining Operations. SME.
- Brown, E.T., 2003.** Water for a Sustainable Minerals Industry – a Review., En Proceedings of



Water in Mining 2003 Conference, Brisbane, Australia, 13-15 Oct, 2003, AusIMM Publication Series 6/2003.

**Cairney, T. y Frost, R.C., 1975.** A case study of mine water quality deterioration, Mainsforth Colliery, County Durham, J. Hydrol. 25.

**Caponera D.A., 2003.** National and international water law and administration” Kluwer Law International 2003 .

**Carter, J. y Howe, J., 2006.** Stakeholder participation and the water framework directive: The case of the Ribble Pilot, Local Environment, vol. 11, n° 2.

**CAZALAC – Proyecto apoyo técnico Mesa de Agua Región de Coquimbo, Informe Primer Taller Ampliado, Set 2008**

**COCHILCO, 2008.** Buenas Prácticas y Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera, Comisión Chilena de Cobre, Santiago.

**Comisión Europea, 2000.** Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L327.

**Consejo Minero, 2002a.** Buenas Prácticas y Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera, Santiago

**Consejo Minero, 2002b.** Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera, Santiago

**Cooke, R., 2008.** Pipelines design for paste and thickened tailings Systems. Tailings and mine Waste 2008. Vail, Colorado.

**Cortes Lucas, A., 2006.** Gestión de sedimentos en la cuenca del Llobregat: Aplicaciones de la fitorremediación en el saneamiento de metales pesados. II jornadas de la Red de Intercambio de Conocimiento sobre Sedimentos. Santander, 6 Octubre .

**Custodio E., Llamas M.R., 1996.** Hidrología Subterránea. 2 tomos. Ed. Omega S.A., Barcelona –España.

**Davies M.P., P.C Lighthall., S. Rice y Martin, E.T, 2002.** Design of Tailings Dams and Impoundments., Phoenix.

**Davis, M., 2004.** World experience with tailings stacking. Conrad Tailings Seminar. Alberta research council. Noviembre 2004 .

**DGAAM, 1995.** Guía Ambiental para Actividades de Exploración de Yacimientos Minerales en el Perú, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General Asuntos Ambientales Mineros, Lima. <http://www.gtci-camisea.com.pe/webantiguo/archivos/dgaam/legislacion/guias/actiexployci.pdf>

**Dourojeanni, A. y Jouravlev, A., 1999.** Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), LC/R.1948, 16 de diciembre de 1999 (disponible en Internet: <http://www.eclac.cl/publicaciones/RecursosNaturales/8/LCR1948/LCR1948-E.pdf>).

**Dourojeanni, A. y Jouravlev, A., 2001.** Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua (Desafíos que enfrenta la implementación de las recomendaciones contenidas en el capítulo 18 del Programa 21), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), LC/L.1660–P, diciembre de 2001, Serie Recursos Naturales e Infraestructura No 35, Santiago, Chile (disponible en Internet: <http://www.eclac.cl/publicaciones/SecretariaEjecutiva/0/LCL1660PE/lcl1660PE.pdf>).

**Dourojeanni, A., Jouravlev, A., Chávez, G., 2002.** Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. CEPAL. SERIE Recursos Naturales e Infraestructura N° 48.

- DRET 2008.** Water Management. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry, Department of Resources, Energy and Tourism, Australia. <http://www.ret.gov.au/resources/Documents/LPSDP/LPSDP-WaterHandbook.pdf>
- Emery, A.C., 2005.** Buenas Prácticas de Preparación y Respuesta ante Emergencias. Documento preparado para el ICMM y PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), September 2005. [http://revistavirtual.redesma.org/vol6/pdf/legislacion/Buenas\\_practicas\\_y\\_preparacion\\_para\\_la\\_respuesta\\_ICMM.pdf](http://revistavirtual.redesma.org/vol6/pdf/legislacion/Buenas_practicas_y_preparacion_para_la_respuesta_ICMM.pdf)
- Environment Australia, 1999.** Water Management. Best Practice Environmental Management in Mining, Dept. of Environment and Heritage, Australia. <http://www.ret.gov.au/resources/Documents/LPSDP/BPEMWater.pdf>
- EPA 1312.** Synthetic Precipitation Leaching Protocol (SPLP). Capitulo 6 de SW-846: Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods. Environmental Protection Agency..
- EPA, 1995.** Environmental Monitoring and Performance, Best Practice Environmental Management in Mining series, Environmental Protection Agency Australia. <http://commdev.org/content/document/detail/1173/>
- EPA, 2005.** A simple field leach test to assess potential leaching of soluble constituents from mine wastes, soils and other geologic materials EPA 1312.
- Erickson, J., 1996.** Glaciar Geology. Facts on File, Inc.
- ERMITE Consortium, 2004.** Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technica and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. Mine Water and the Environment 23: Supplement 1. Tambien se pueden encontrar en [http://www.ncl.ac.uk/environment/research/documents/ERMITE\\_D6.pdf](http://www.ncl.ac.uk/environment/research/documents/ERMITE_D6.pdf)
- ERMISA, 2006.** Estado de la Situación sobre la Gestión del agua en la Minería: El caso Peruano. Informe del proyecto “Regulación Ambiental de Aguas de Minas en Sudamérica” (ERMISA) a la Comisión Europea, Lima, Peru. [www.labor.org.pe/webermisa/images/ERMISA%20D1.pdf](http://www.labor.org.pe/webermisa/images/ERMISA%20D1.pdf)
- Evangelou, V.P. , 2001.** Pyrite microencapsulation technologies: Principles and potential field application. Ecological Engineering Volume 17, Issues 2-3, 1 July 2001.
- Evangelou, V.P., 1995.** Potential microencapsulation of pyrite by artificial inducement of ferric phosphate coatings. J. Environ. Quality 24.
- Evangelou, V.P., 1995b.** Pyrite Oxidation and Its Control. CRC Press, Boca Raton, FL .
- Evangelou, V.P., y Huang, X., 1994.** H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> induced oxidation proof phosphate surface coating on iron sulfides. U.S. Patent No. 5,286,522.
- Evangelou, V.P., 1996.** Pyrite oxidation inhibition in coal waste by PO<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>pH-buffered pretreatment. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1748-0949, Volume 10, Issue 3, 1996.
- FAO, 2007.** World reference base for soil resources 2007.3rd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Fernández Rubio, R., 1998.** Impacto Hidrológico del Cierre de Minas. E.T.S.I.M.M. e IGME
- Fernández Rubio, R. 2007.** Rehabilitación de Espacios Mineros. Conferencia de Clausura del XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales. 7-11 de Octubre de 2007. Oviedo.
- Foro del Agua de las América, 2008.** Información de la Región Sudamérica, Octubre 2008
- Fourie, A.B., y Tibbett, M., 2007.** post Mining Landforms. Engineering a Biological System. En

Fourie, A., Tibbett, M. y Wiertz, J., 2007. Mine Closure Proceedings. Santiago de Chile.

**Gavaskar, A.R., Gupta, N., Sass, B.M., Janosy, R.J. and O’Sullivan, D., 1998.** Permeable Barriers for Groundwater Remediation: Design Construction and Monitoring. Battelle Press, Columbus.

**Glicken, J. 2000.** Getting stakeholder participation ‘right’: a discussion of participatory processes and possible pitfalls. Environ. Sci. Policy, vol. 3.

**Gzyl, G. y Banks, D., 2007.** Verification of the “first flush” phenomenon in mine water from coal mines in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. Journal of Contaminant Hydrology, vol. 92.

**Harbaugh, A. W., 2005.** MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. Techniques and Methods 6–A16. U.S. Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/>, <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow.html>

**Hem, J.D., U. S. Geological Survey, 2005.** Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. University Press of the Pacific.

**Herman, G., 2006.** The Invisible Mine: Zero Environmental Water Impacts. Water in Mining 2006 Proceedings. 14 – 16 noviembre de 2006. Brisbane, Australia .

**Holdridge, 1987,** A Complete Cosmology.

**Houston, J., 2007.** Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques Jour. Hydrology N°334.

**Huminicki, D.M.C., Rimstidt, J.D., 2009.** Iron oxyhydroxide coating of pyrite for acid mine drainage control. Appl. Geochem. En prensa. Aceptado 21 April 2009

**Intawongse M., y Dean, J.R., 2008.** Use of the physiologically-based extraction test to assess the oral bioaccessibility of metals in vegetable plants grown in contaminated soil. Environmental Pollution. Vol. 152, n° 1.

**Jarvis, A.P. y Younger, P.L., 2000.** Passive treatment of net-acidic mine waters: field experiences in the UK. 7° IMWA Congress Proceedings. Kattowice. Poland .

**Jarvis, A.P. y Younger, P.L., 2001.** Passive treatment of ferruginous mine waters using high surface area media. Water research 2001;Vol. 35, N° 15.

**Kaden, S., Luckner, L., Peukert, D. y Tiemer, K., 1985.** Decision support model systems for regional water policies in open-pit lignite mining areas. Journal Mine Water and the Environment/ International Journal of Mine Water, vol. 4, no. 1.

**Komnitsas, K., Bartzas, G., Paspaliaris, I., 2006.** Modeling of Reaction Front Progress in Fly Ash Permeable Reactive Barriers Environmental Forensics, Vol. 7, n° 3.

**Kuma, J.S., Younger, P.L., y Bowell, R.J., 2002.** Expanding the hydrogeological base in mining EIA studies: A focus on Ghana. Environmental Impact Assessment Review 22.

**LABOR, 2008.** “Comités de Monitoreo y Vigilancia Ambiental Participativo”. Asociación Civil Labor, Callao, Octubre 2008. [www.labor.org.pe/descargas/EI%20agua%20nos%20reune.pdf](http://www.labor.org.pe/descargas/EI%20agua%20nos%20reune.pdf)

**Lara, F., 2003.** Cíaunurización Vat Leaching como alternativa en la pequeña minería y minería artesanal. En: Pequeña minería y minería artesanal en Iberoamérica: conflictos, ordenaciones y soluciones.

**Longo, S. y Wilson, M., 2007.** Paste rock: part of the future for mine waste management?. Canadian Mining Journal, Octubre 2007 .

**López Jimeno, C., 2007.** Manual de construcción y restauración de escombreras. E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid.

- Loredo J., Ordoñez. A, y Pendas F.,2001.** La esconbrera de Morgao como acuífero: estudio hidro geoquímico. En Ballester, A., Grima, J., Lopez, J.A: y Rodriguez, L, 2001. Investigación, Gestión y Recuperación de Acuíferos Contaminados. IGME y Diputación de Alicante.
- Loredo, J., Marqués, A.L., Beggs, C., Venegas, M.,2008.** Revisión del estado de arte en la gestión del agua en zonas áridas y semiáridas con minería. Editores: Younger, P., Amezaga, J., Rötting, T. Deliverable 6 del Proyecto CAMINAR
- Loredo, J., Marqués, A.L., García-Ordiales, E., 2009.** Mine water reuse. AMIREG 2009. 3º international conference. Towards sustainable development: Assessing th footprint of resource utilisation and hazarous waste management. 7-9 septiembre, Atenas, Grecia.
- MAC, 1998.** A Guide to the Management of Tailings Facilities. The Mining Association of Canada, Ottawa, Ontario. <http://www.mining.ca/english/publications/tailingsguide.pdf>
- Macias, F., Camps, M., Macias Vazquez, F, 2009b.** Utilización de Tecnosoles derivados de residuos en procesos de restauración de suelos de la mina Touro. Conferencia Internacional sobre Minería Sostenible. Santiago de Compostela. 15,16,17 de Abril .
- Macías, F., Fontán, L., Otero, X., Pérez, C., Camps, M., Macias Vazquez, F., 2009a.** Recupera-ción de aguas ácidas de la mina Touro mediante sistemas integrados de barreras reactivas con diferentes Tecnosoles y humedales. Conferencia Internacional sobre Minería Sostenible. Santiago de Compostela. 15,16,17 de Abril .
- Martinez Ponce de Leon, J.G. 2001.** Introducción al análisis de riesgos. Editorial Limusa, Mexico.
- McQuade, CV, Riley, SJ, 1996.** Mine Water Management in Australia - its Coming of Age, en: Fourth International Conference on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP), 1996, Cagliari, Italy, October 7 - 11, (ed. R Ciccu).
- Meggyes, T, 2008.** Paste and thickened tailings technology.
- Mendez, M.O. y Maier, 2008.** Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environ-ments: An Emerging Remediation Technology. Environmental Health Perspectives. Vol. 116. Nº 3.
- Mendez, M.O., Glenn, E.P. y Maier R.M., 2007.** Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: growth, metal accumulation, and microbial community changes. Journal of Environ-mental Quality. Nº 36.
- Michard, J., 2008.** Cooperativas Mineras en Bolivia: Formas de organización, producción y co-mercialización, CEDIB. <http://www.cedib.org/index.php?/mineria/cooperativas-mineras-en-boli-va.html>
- Mitsch W, y Gosselink, J., 1993.** Wetlands. 2nd edn. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, USA,.
- Morgan, R. P. C., 2005.** Soil erosion and conservation. Blackwell Publishing company, 316 pp.
- Napier-munn, T. J. y Morrison, R. D., 2003.** The potential for the dry processing of ores. In: , Water In Mining 2003 Conference. Water In Mining 2003, Brisbane, QLD, 13-15 Oct, 2003.
- Nawalany, M., Sinicyn, G., Kochanek, K. y Czyzkowski B., 2003.** A decision support system for groundwater: water management issues for opencast mining. En: Rosenbaum, M.S. y Turner, A.K. (Eds.). New Paradigms in Subsurface Prediction, Springer, Berlin.
- Norgate, T.E.,y Iovel, R., 2004.** Water use in metal production: A life cycle perspective. CSIRO Minerals. DMR-2505.
- O'Connor, M, Clout, J y Nicholson, R., 2002.** Dry particle separation – A contribution to sustain-

nable processing. Green Processing 2002, (The AusIMM), Cairns, May 2002.

**O’Kane, M., D. Christensen, G. Vasques 2007.** Closure Designs for the Bajo de Alumbra Mine, Argentina: Evaluation of Store and Release Test Plot Cover System Designs in an Arid Environment. En Fourie, A., Tibbett, M. y Wiertz, J., 2007. Mine Closure Proceedings.

**Orche, E., 2003.** Cierre de explotaciones en la pequeña minería y la minería artesanal. En: Pequeña minería y minería artesanal en Iberoamérica: conflictos, ordenaciones y soluciones.

**Orche, E., 2009.** Tratamiento en Iberoamérica de la seguridad en la pequeña minería y minería artesanal del oro a cielo abierto. Conferencia Internacional sobre Minería Sostenible. Santiago de Compostela. 15,16,17 de Abril .

**Palkovits, F., 2007.** How the mining sector is responding to change in disposal of tailings and waste rock. Engineering and mining journal. Diciembre 2007 .

**Palkovits, F., 2008.** Better results from thickened tailings. Mining engineering, Febrero 2008 .

**Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. 1999.** User’s Guide to PHREEQC (Version 2)—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. USGS Water-Resources Investigations Report 99-4259, Denver, Colorado.

**Paulo de souza, V., Freitas, F.A., 1999.** Recuperação do ouro por amalgamação e cianuração. Problemas ambientais e possíveis alternativas. CETEM

**Perrow, M.R., y Daly, A.J., 2002.** Handbook of Ecological Restoration. 2 vol. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

**PIRAMID, 2003.** Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project No. EVK1-CT-1999-000021 “Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage” (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK.

**PNUMA, 2002.** Perspectivas del medio ambiente mundial, GEO 3. Mundiprensa, México-Barcelona.

**Priyashantha, S., Ayres, B., O’Kane, M., Fawcett. M. 2009.** Assessment of Concave and Linear Hillslopes for Post-Mining Landscapes. Proceedings of the Securing the Future and 8th ICARD Conference, June 23-26, 2009, Skellefteå, Sweden.

**Ramani, R., 2009.** Land Reclamation to Sustainable Development: The Changing Mine Planning Paradigm. Conferencia Internacional sobre Minería Sostenible. Santiago de Compostela. 15,16,17 de Abril .

**Rebollo, J.L., 2009.** Strategy issues in the Mineral Industry. En Sustainable Management of Mining Operations, Botin Ed. Capitulo 4. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). Littleton, Co., USA .

**Reynoso, V.M., 2003.** Desarrollo y sostenibilidad de la minería artesanal en Perú. En Pequeña minería y minería artesanal en Iberoamérica: conflictos, ordenaciones y soluciones.

**Robertson, A., Mac, G. y Shaw, S.C., 2008.** Alternatives Analysis for Mine Development and Reclamation. Robertson GeoConsultants Inc. Vancouver, BC, Canada

**Schnoor, J.L. 1997.** Phytoremediation: Technology Evaluation Report, GWRTAC Series

**Schnoor, J.L., 2002.** Phytoremediation of soil and ground water. GWRTAC (Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center) Technology Evaluation Report TE-02-01.

**Spotts, R. y Burrell, J.K., 1997.** Surface Water Quantity. Pp. 162-165. En Marcus, J.J., Mining

Environmental Handbook.

**Sutherson, S. S., 1999.** Phytoremediation. En: Remediation engineering: design concepts kitabı. Sutherson, S. S. (editör). CRC Press LLC. Boca Raton .

**Sutherson, S. S., 2002.** Natural and Enhanced Remediation Systems. New York, CRC Press. Boca Raton .

**TAILSAFE, 2007.** Tailings Management Facilities. A State of the Art Report.

**Trujillo, Elvys, 2005.** La Minería Cooperativizada Apoyada con Manos Femeninas: Las Palliris. NOVIB (Oxfam Netherlands)- Centro de Investigación y Servicio Popular (CISEP). Oruro, Bolivia, junio de 2005 .

**Vandiviere, M.M., y Evangelou, V.P., 1998.** Comparative testing between conventional and microencapsulation approaches in controlling pyrite oxidation. Journal of Geochemical Exploration. Volume 64, Issues 1-3, November 1998.

**Veiga, M.M., y Hinton, J.J., 2002.** Abandoned Artisanal Gold Mines in Latin America: A Legacy of Mercury Pollution, Natural Resources Forum, Vol. 26.

**Verlaan P. y Wiltshire, J., 2000.** Manganese Tailings - a Potential Resource? Mining Environmental Management, vol. 8 n°4.

**Vidales Rubí, L. 2003.** Glosario de términos financieros: términos financieros, contables, administrativos, económicos, computacionales y legales. Plaza y Valdes.

**Watzlaf, G.R. y Hyman, D.M., 1995.** Limitations of passive systems for the treatment of mine drainage. 17th Annual Conference of National Association of Abandoned Mine Land Programs, French Lick, USA .

**Watzlaf, G.R., 1998.** Passive treatment systems for the treatment of mine drainage: reducing and alkalinity producing systems. En: Reunion científico tecnica sobre el agua en el cierre de minas. Oviedo. E.T.S. de Ingenieros de Minas .

**Watzlaf, G.R., Schroeder, K.T., Kleinman, R.L. P., Kairies, C.L. y Nairn, R.W., 2004.** The Passive Treatment of Coal Mine Drainage. Springfield, National Technical Information Service.

**Weiersbye, I.M, 2007.** Global review and Cost Comparison of Conventional and Phyto-technologies for Mine Closure. En Fourie, A., Tibbett, M. y Wiertz, J., 2007. Mine Closure Proceedings. Santiago de Chile.

**Weiersbye, I.M., Witkowski, E.T.F., Reichardt, M. 2006.** Floristic composition of gold and uranium tailings dams, and adjacent polluted areas, on South Africa's deep-level mines. Bothalia Vol. 36, N°1.

**Wurbs, R.A., 2009** Water Rights Analysis Package (WRAP) Modeling System Users Manual, 6th Edition. Technical Report 256, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. <https://ceprofs.civil.tamu.edu/rwurbs/wrap.htm>

**Yilmaz, E., Kesimal, A., Erçikidi, B., 2004.** Evaluation of acid producing sulphidic mine tailings as paste backfill .

**Younger, P.L. 1997.** The longevity of minewater pollution: A basis for decision-making. Science of the Total Environment, 194/195.

**Younger, P.L. 2000.** Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines: a first approximation. Journal of Contaminant Hydrology 44.

**Younger, P.L., Banwart, S.A. y Hedin, R.S., 2002.** Mine water. Hydrology, pollution, remediation. Kluwert academic publishers.

**Younger, P.L., Jayaweera, A., Elliot, A., Wood, R., Amos, P., Daugherty, A. J., Martin, A., Bowden, L., Aplin, A.C., y Barrie Johnson, D., 2003.** Passive treatment of acidic mine waters in subsurface-flow systems: exploring RAPS and permeable reactive barriers. Land Contamination & Reclamation, Vol.11. n° 2.

**Younger, P.L., y Loredo, J., 2008.** Hidrogeología y minería de carbón: un drama en tres escenas. En Investigación y gestión de los recursos del subsuelo. Libro homenaje al profesor Fernando Pendás Fernández. IGME.