

---

---

REPUBLICA DEL PERU

---

---

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

---

---

PROCOLO DE MONITOREO  
DE CALIDAD DE AGUA

---

---

SUB-SECTOR MINERIA

DIRECCION GENERAL DE  
ASUNTOS AMBIENTALES  
PROYECTO EMTAL

LIMA - PERU

**PREPARADO POR:**

LINDA BROUGHTON

# Prólogo

---

## PROLOGO

Esta Guía es la segunda de una serie a prepararse, con el objeto de ayudar a la Industria Minero-Metalúrgica en el desarrollo de Sistemas de Manejo Ambiental y representa el cumplimiento del Art. 5to. del Decreto Supremo N° 059-93-EM, de fecha 10 de diciembre de 1993, en relación al Medio Ambiente.

Técnicamente, las pautas que se describen a lo largo del texto, deben asistir a las Empresas Minero-Metalúrgicas, en el establecimiento de sus Programas de Monitoreo para los distintos flujos o corrientes de aguas superficiales (externos e internos) que se manifiestan en las áreas de influencia de sus actividades operativas. Más específicamente, ellas comprenden la definición de las fuentes de contaminación, ubicación de las estaciones de muestreo, precisión de parámetros a determinarse en cada estación y la frecuencia de sus mediciones, métodos generales y específicos, toma de muestras, preservación y análisis de muestras, criterios de selección de laboratorios analíticos y colección y análisis de la información registrada.

La correcta aplicación de estos procedimientos debe conducir a la obtención de información confiable y que, además, pueda ser comparada entre las distintas Empresas Minero Metalúrgicas. Contribución a la contaminación que ejercen en cada una de sus áreas de influencia. Un diagnóstico adecuado de su aporte a la polución de las causas naturales de agua, ayudará a tomar las medidas correctivas que puedan implementarse de inmediato, en un plazo de mas largo término.

Tratándose de un programa que se inicia, esperamos que con el transcurso del tiempo y con la experiencia que vayan ganando las Autoridades Normativas y la Industria durante la implementación de las prácticas ambientales, se producirán revisiones y mejoras del documento, por lo que comentarios y sugerencias serán bienvenidos a la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Energía y Minas.

	<b>Página</b>
<b>1.0 INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Calidad de Agua .....	1
1.2 Las Minas en el Perú .....	1
1.3 Tipos de Mina .....	2
1.4 Nivel de Desarrollo .....	3
1.5 Programa de Monitoreo .....	4
<b>2.0 ESTACIONES DE MUESTREO .....</b>	<b>7</b>
2.1 Alcance .....	7
2.2 Definición de los Componentes .....	8
2.3 Descripción de los Componentes .....	8
2.3.1 Labores Subterráneas .....	8
2.3.2 Tajos Abiertos .....	10
2.3.3 Pilas o Botaderos .....	12
2.3.4 Relaves .....	14
2.3.5 Concentradora e Instalaciones de Procesamiento .....	16
2.3.6 Infraestructura e Instalaciones Generales .....	16
2.3.7 Medio Ambiente Receptor .....	17
<b>3.0 ANALISIS DE LA CALIDAD DE AGUA .....</b>	<b>21</b>
3.1 Parámetros .....	21
3.2 Frecuencia .....	25
3.2.1 Monitoreo Regular para Caracterización Inicial .....	25
3.2.2 Etapa de Operación .....	26
<b>4.0 MUESTREO DE CAMPO .....</b>	<b>31</b>
4.1 Introducción .....	31
4.2 Preparación .....	31
4.2.1 Equipos .....	33
4.2.2 Instrumentos Analíticos .....	34
4.3 Tipos de Muestras .....	34
4.4 Garantía de Calidad (QA)/Control de Calidad (QC) en las Mediciones de Campo .....	35
4.5 Programa de Campo .....	37
4.5.1 Observaciones .....	37
4.5.2 Toma de Muestras .....	38
4.5.3 Mediciones de Campo .....	39
4.5.4 Preservación de la Muestra .....	40

# Índice

4.5.5	Rotulado .....	41
4.5.6	Almacenamiento, Manipuleo y Embarque .....	42
<b>5.0</b>	<b>ASPECTOS ANALITICOS .....</b>	<b>43</b>
5.1	Selección del Laboratorio .....	43
5.2	Garantía de Calidad(QA)/Control de Calidad (QC) en los Laboratorios .....	44
5.3	Certificación y Evaluación del Laboratorio .....	45
<b>6.0</b>	<b>MANEJO DE DATOS E INFORMES .....</b>	<b>47</b>
6.1	Fuentes de Datos .....	47
6.2	Manejo de Datos .....	47
6.3	Evaluación de Datos .....	50
<b>7.0</b>	<b>REFERENCIAS SELECCIONADAS .....</b>	<b>51</b>
	APENDICE 1 .....	53
	HOJA DE REGISTRO PARA DATOS DE CAMPO .....	55
	CASILLA 3 - REQUISITOS ANALITICOS .....	56

## 1.0 INTRODUCCION

### 1.1 Calidad de Agua

En todas las minas del mundo se están formulando las mismas preguntas concernientes a la protección del medio ambiente:

- ¿estamos operando eficientemente?
- ¿estamos ocasionando problemas ambientales?
- ¿qué calidad de agua de efluente es necesaria para la protección ambiental?
- ¿puede lograrse con la tecnología y costos actuales?
- ¿cómo podemos medir nuestro éxito?

La intención de un programa de muestreo de calidad de aguas superficiales es ayudar a absolver tales preguntas.

Este documento constituye una guía práctica para la implementación de un programa básico de monitoreo de aguas superficiales para las minas en el Perú. Se preparó, en parte, para dar cumplimiento al DS-016-93 EM, emitido por el gobierno peruano, junto con sus modificatorias incluidas en el DS-059-93-EM. Estas pautas ayudarán a las compañías mineras y metalúrgicas a definir estaciones de muestreo, parámetros y análisis representativos, así como coleccionar muestras de agua confiables para caracterizar la calidad de agua del sitio o lugar minero.

No obstante, debe reconocerse que el programa de monitoreo será específico **por sitio** y que los diferentes tipos de minas e instalaciones de procesamiento, etapa o nivel de desarrollo, geología, hidrología y topografía determinarán en conjunto el referido programa. Este documento proporciona guías y ejemplos basados en estándares prácticos aceptados a fin de colaborar en el diseño e implementación de un programa de monitoreo de la calidad de aguas superficiales.

Se recomienda enfáticamente al supervisor de asuntos ambientales que revise los programas específicos con la DGAA. Para mayor información sobre temas específicos, al final de este documento se enumeran referencias. Muchas de éstas se encuentran disponibles en la biblioteca de la DGAA.

### 1.2 Las Minas en el Perú

El enfoque para el monitoreo y las sugerencias para los procedimientos comunmente utilizados, que aparecen en este manual, se efectúan haciendo específica referencia a la industria minera

que se desarrolla actualmente en el Perú. En vista de que los principios básicos de monitoreo de calidad de agua son comunes en todo el mundo, los programas deben orientarse a las condiciones específicas y requisitos de información de cada industria.

En el Perú existen aproximadamente 170 minas metálicas actualmente operativas. Siete de ellas se clasifican como minas grandes, las cuales producen más de 5 000 tpd, existiendo también minas más pequeñas que producen menos de 25 tpd. La mayoría de las minas son de cobre, oro o polimetálicas, habiendo, en menor cantidad, minas de hierro, estaño y tungsteno.

Usualmente, los concentrados producidos en estas minas se procesan o refinan en una fundición distante nacional o extranjera. Actualmente existen 9 plantas metalúrgicas que operan en el Perú y que producen cobre, plomo, zinc, plata y cantidades menores de otros metales terminados. Además, existen cerca de 100 minas no metálicas, principalmente medianas y pequeñas productoras de caliza, arcilla y sílice.

Las áreas mineras en el Perú se ubican a lo largo del país, en una variedad de regiones geológicas, topográficas y climatológicas. La precipitación pluvial mensual puede oscilar entre 2mm en la región costera hasta 460 mm en las regiones selváticas. En la zona montañosa, las precipitaciones pueden variar entre 0mm a más de 100 mm en un año.

De ese modo, la ubicación de la mina determinará el balance de agua del sitio, lo que puede variar considerablemente de lugar a lugar.

La calidad de agua de los efluentes (por ejemplo, cualquier agua que se descarga de la mina o de la planta procesadora) que drenan de cada sitio minero es específica de dicho sitio. Algunos sitios o lugares mineros han establecido programas regulares de muestreo para componentes específicos; sin embargo, hasta la fecha no hay suficientes datos para caracterizar la calidad del agua en las minas del Perú. Parece ser que los principales problemas que se someterán a monitoreo sobre calidad de agua en las minas, incluyen:

- ❖ drenaje ácido con elevadas concentraciones de sulfatos y metales disueltos;
- ❖ sólidos en suspensión y contenido de metales totales asociados;
- ❖ drenaje casi neutro con elevadas concentraciones de metales disueltos y nutrientes;
- ❖ reactivos químicos de proceso, especialmente cianuro; y
- ❖ aguas negras o servidas

## 1.3 Tipos de Mina

El tipo de mina se describe por:

- ♦ la geología de la mina, el mineral y los desechos y
- ♦ el método de explotación

La geología del yacimiento y la roca encajonante determinarán los parámetros que serán de importancia. Por ejemplo, un yacimiento polimetálico, de sulfuros de metales bases, requerirá un análisis con una serie mucho más extensa de parámetros de calidad de agua que un yacimiento de oro asociado a cuarzo o arenisca.

El método de explotación determinará la cantidad de perturbación interior o superficial y la cantidad y tipo de desecho minero producido. Por ejemplo, el laboreo de minas subterráneas genera relativamente poco desecho mineral en comparación con una operación de tajo abierto. De ese modo, en una operación subterránea, la fuente principal de contaminantes de la calidad de agua serían las labores en la mina y los relaves. En un tajo abierto, el agua superficial que se filtra a través de roca estéril podría ser la principal fuente de contaminantes.

El método de procesamiento determinará el tipo, cantidad y calidad del flujo de agua desde la planta.

Generalmente, las concentradoras, con un circuito de flotación, ofrecerán un menor rango de problemas potenciales sobre la calidad de agua que las grandes refinerías que producen una variedad de metales terminados diferentes y usan gran cantidad de reactivos químicos para el procesamiento. Además, las instalaciones para el manipuleo de metales y concentrados, control de polvo y almacenamiento y manipuleo de reactivos y combustibles pueden aportar contaminantes al agua de drenaje.

## 1.4 Nivel de Desarrollo

Durante las diferentes etapas en la vida de una mina, desde el desarrollo pasando por la operación hasta el cierre, existen diferentes prioridades para un programa de monitoreo.

**Etapas de Exploración y Desarrollo.** Generalmente, el período de desarrollo dura de uno a tres años, tiempo en el cual la prioridad en el monitoreo es definir las condiciones «naturales» e identificar los potenciales problemas en la calidad de agua. En áreas mineras antiguas, esto puede ser evidentemente difícil, pero el énfasis debe ponerse en la definición de la calidad del agua antes de la operación. Ello a menudo se denomina la «línea de referencia» o «base» para la nueva actividad operativa.

**Etapas de Operación.** Una vez que la mina se encuentra en operación, empieza el monitoreo más intenso. En el Perú, es necesario definir la calidad de agua que sale de cada mina y



determinar la calidad del efluente que sea aceptable para el ambiente. Así, el agua que fluye dentro y fuera de la propiedad debe muestrearse en forma regular para determinar su calidad y cantidad. Se establece un programa regular y se revisa para verificar la existencia de cambios en el procesamiento, manejo de desechos o por indicio mediante los datos obtenidos en el monitoreo de la calidad del agua.

Después de que concluye la actividad minera y se desactiva la mina, los objetivos del monitoreo deberán asegurar que no existen fuentes de contaminación de la calidad del agua que se manifiesten a largo plazo. Si no hubiera preocupaciones potenciales sobre la calidad del agua identificadas durante la operación, el período de monitoreo y la intensidad pueden ser bajos (tal vez dos grupos de muestras cada uno o dos años). Si existieran contaminantes de importancia o se hubiera identificado una posible liberación futura (por ejemplo, la evolución de un drenaje ácido), se realiza un muestreo regular hasta que se demuestra que no existen problemas o que las medidas de control son efectivas.

## 1.5 El Programa de Monitoreo

El término «agua superficial» se utiliza en este texto para hacer referencia a cualquier tipo de agua que se encuentre al nivel de la superficie o por encima de la misma (por ejemplo, un lago, río o corriente) o al agua que se dirige a un cuerpo de agua superficial (como agua bombeada de labores subterráneas a la superficie). En muchos casos, las aguas freáticas se vuelven aguas superficiales mediante patrones de flujos naturales. Se refiere a cualquier tipo de agua que pueda muestrearse sin usar un pozo artesiano o una instalación artesiana de monitoreo.

Los programas de monitoreo de la calidad de agua que se realizan en la mayoría de minas en el Perú se encuentran bajo la responsabilidad de la «oficina de asuntos ambientales». En cada área de influencia de una mina normalmente se encuentra presente una persona encargada de todos los asuntos ambientales.

Esta persona puede contar con la colaboración de un personal conformado por uno o más «técnicos» capacitados para llevar a cabo los trabajos correspondientes a un programa de monitoreo. Para garantizar la obtención de resultados consistentes y confiables de un programa de monitoreo, es importante contar con un grupo homogéneo de personas, debidamente capacitadas, que tengan bajo su responsabilidad el monitoreo de calidad de agua.

En este texto, por el término «supervisor de asuntos ambientales» se entenderá aquella persona que se encuentre a cargo de los asuntos ambientales de un sitio minero o compañía minera.

# Introducción

---

El gobierno peruano ha establecido un cronograma para la implementación de programas de monitoreo de la calidad de aguas superficiales (1994/1995), tal como se muestra en el Cuadro 1.1, de conformidad con el Reglamento DS-016-93-EM y sus modificatorias descritas en el DS-059-93-EM.

Este cronograma establece que el primer año de monitoreo regular consta de tres períodos de información de tres meses cada uno, debiéndose presentar, como cuarto informe trimestral, el denominado EVAP. Las primeras tareas asociadas con cada período, de conformidad con los reglamentos arriba mencionados, también aparecen en el Cuadro 1.1.

**Cuadro 1.1**  
**Cronograma para el Monitoreo de Aguas Superficiales**

Fecha/Periodo	Actividad Principal	Actividad de Monitoreo Específico	Reporte
febrero. 28, 1994	El gobierno emite el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua		
marzo 94	empieza el programa de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• seleccionar y capacitar al grupo de asuntos ambientales</li> <li>• comprar equipo</li> <li>• Iniciar la selección del laboratorio de análisis</li> </ul>	
marzo - mayo 94	primer periodo de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• definir programa de monitoreo</li> <li>• estaciones de monitoreo</li> <li>• seleccionar laboratorio e iniciar QA/QC</li> </ul>	
junio 94	primer periodo de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• verificar todos los equipos de campo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• descripción y plano del sitio de los componente, estaciones</li> <li>• informe de datos y evaluación de resultados</li> </ul>
junio - agosto 94	segundo periodo de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• continuar monitoreo</li> <li>• volver a evaluar estaciones</li> <li>• corregir procedimientos inadecuados, etc</li> <li>• ajustar la frecuencia para variaciones estacionales</li> </ul>	
setiembre 94	segundo periodo de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• evaluar los resultados de laboratorio y QA/QC</li> <li>• verificar todo el equipo de campo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• informe de datos para el periodo</li> <li>• gráficos de todo los datos a la fecha</li> <li>• evaluación estacional de las variables de cada estación de muestreo</li> </ul>
set - nov 94	tercer periodo de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• continuar monitoreando</li> <li>• ajuste frecuencia para variaciones estacionales</li> </ul>	
diciembre 94	tercer periodo de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• verificar todo el equipo de campo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• informe de datos para el periodo</li> <li>• evaluación de variables de estaciones afectadas estacionalmente</li> </ul>
diciembre 94 febrero 95	cuarto periodo de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• continuar el monitoreo</li> <li>• definir el programa para el próximo año en términos de estaciones, parámetros y frecuencias</li> </ul>	
marzo 95	EVAP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• evaluar el desempeño del laboratorio</li> <li>• brindar mantenimiento a todo el equipo de campo</li> </ul>	

## 2.0 ESTACIONES DE MUESTREO

**E**l área de influencia de una mina puede abarcar una gran superficie, combinando labores antiguas, abandonadas (y algunas veces olvidadas) con las operaciones actuales. Independientemente de la complejidad de la mina, existen características comunes para todas las minas que proporcionan la base para identificar *dónde efectuar el muestreo*.

### 2.1 Alcance

El primer paso para decidir dónde efectuar el muestreo por calidad de agua es identificar el balance de agua de la propiedad minera: de dónde ingresa el agua y por dónde sale de la propiedad minera. El siguiente paso es identificar todas las fuentes posibles de contaminantes y seleccionar las estaciones que se encuentran aguas arriba y aguas abajo de cada fuente.

Para ejecutar lo antedicho:

- En un plano de la propiedad minera, marque todos los cursos naturales de agua (ríos, corrientes, lagos) y la dirección y volumen del flujo (aproximadamente).
- En el mismo plano, marque todas las corrientes de agua del proceso, relacionadas con la mina, incluyendo la dirección y volumen del flujo.
- Ubique todos los principales componentes de la mina: tajo abierto, labores subterráneas, embalses de relaves, botaderos, apilamientos de mineral de baja ley o desechos, instalaciones de procesamiento, poblados aledaños y/o campamentos. Estos componentes se definen como las «fuentes potenciales de contaminantes» a que se hace referencia en la siguiente exposición. En algunos casos, un componente también puede ser un «sumidero» de contaminantes; por ejemplo, una roca carbonácea puede neutralizar la acidez y metales disueltos de un drenaje ácido.
- Marque cualquier flujo adicional de agua relacionado con estos componentes.
- Calcule el balance de agua sumando los flujos que entran y salen de cada corriente, a fin de asegurarse que no falta ninguna de estas últimas.
- Utilice las cartas hidrográficas estacionales, los registros de precipitaciones en el área minera y observaciones para identificar los flujos que se presentan todo el año y aquéllos que sólo son estacionales. Los flujos que se presentan todo el año deben monitorearse regularmente. Puede establecerse estaciones en los flujos estacionales,

pero también éstos se someterán a muestreo durante los períodos de estío.

- ☒ Identifique los lugares de muestreo en el plano que demuestran el balance de agua. Debe muestrearse todas las aguas que fluyan en el área de influencia de toda la mina, incluyendo los efluentes del procesamiento que se descargan a los cursos naturales de agua (con frecuencia denominados «ambientes receptores»).

## 2.2 Definición de los Componentes de la Mina (actividad minera)

Para simplificar la ubicación de las estaciones, el área de influencia de la mina puede considerarse geográficamente en términos de los componentes principales. Estos componentes son usualmente las operaciones unitarias que pueden constituir una fuente de contaminación, a saber:

- labores subterráneas;
- tajos abiertos;
- apilamiento de minerales de desecho, incluyendo pilas de escoria, apilamiento de mineral; de minerales marginales
- embalses de relaves, incluyendo pozas de retención de soluciones o de almacenamiento de lodo;
- instalaciones de procesamiento, incluyendo concentradora, refinería, fundición;
- infraestructura y otras instalaciones, incluyendo poblados aledaños o campamentos, labores abandonadas, instalaciones especiales de procesamiento, planta de tratamiento, almacenamiento de lodos y/o residuos, etc.

Las estaciones de muestreo se seleccionan para cada uno de los componentes principales de la actividad minera. En un programa de caracterización inicial, las estaciones de muestreo deberán incluir:

- ❖ Una aguas arriba de cada fuente potencial de contaminantes
- ❖ Una en cada fuente
- ❖ Una aguas abajo de cada fuente potencial de contaminantes

Más adelante se expone sobre estos componentes para ayudar al supervisor de asuntos ambientales a definir los lugares de muestreo. Al final de este capítulo, en la Figura 2.1 y en el Cuadro 2.1 se presenta un ejemplo.

## 2.3 Descripción de los Componentes de la Mina (actividad minera)

### 2.3.1 Labores Subterráneas

Muchas de las minas subterráneas en el Perú se encuentran ubicadas por debajo del nivel de la capa freática natural y, por lo tanto, son minas «húmedas» con un volumen significativo de agua drenada diariamente de las labores. De esta manera, la calidad de las aguas de mina subterráneas

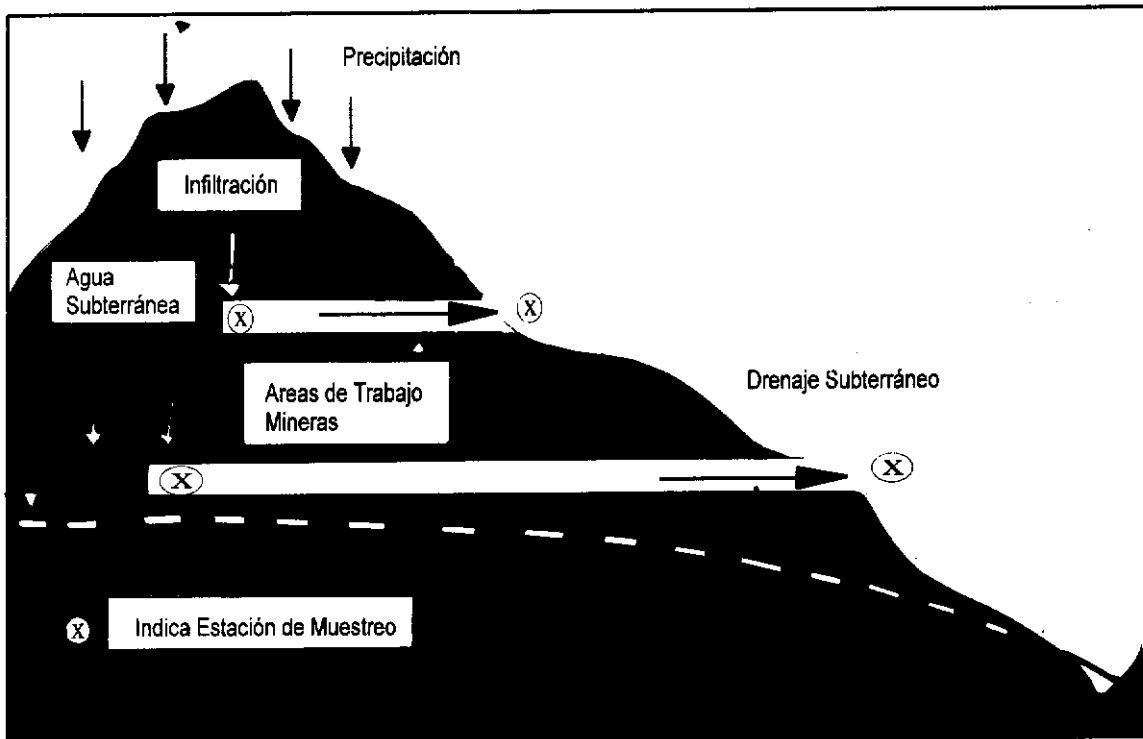
puede cambiar significativamente la calidad del curso natural del agua en la que fluye. Es necesario el monitoreo, tanto del *flujo* de agua como de la *calidad* de la misma, a fin de efectuar la caracterización de la calidad del agua de dicha mina.

Las fuentes de agua que se dirigen a las labores subterráneas usualmente son:

- ♦ infiltraciones de precipitación (lluvia) desde la superficie;
- ♦ flujos naturales de aguas freáticas a través de fallas, fracturas o rocas porosas;
- ♦ aguas bombeadas desde la superficie para perforación, agua potable, etc.

Las aguas freáticas a menudo fluyen dentro de la mina a lo largo de las labores, haciéndose difícil de identificar lugares de muestreo separados. A menos de que existan diferentes fuentes de aguas freáticas, con diferente calidad de agua, normalmente es suficiente seleccionar uno o

**Figura 2.2**  
**Esquema de Muestreo en labores subterráneas**



dos lugares, en diferentes niveles, para efectuar el muestreo. Estos se resumen en la Figura 2.2. Si se ha instalado pozos de aguas freáticas para desagüe o suministro de agua, puede recolectarse las muestras de estos pozos.

Es usual que el agua subterránea se bombee o drene naturalmente hacia la superficie, posiblemente a través de un sistema de túneles. Como mínimo, una estación de muestreo debe quedar ubicada en el punto de descarga de la zona subterránea y/o del túnel. La estación debe estar ubicada aguas arriba con relación al río o al lago en el cual se descarga las aguas subterráneas. Si se colecta el drenaje en un sumidero subterráneo común, las muestras pueden extraerse de dicho sumidero.

Puede haber un cambio considerable en la calidad del agua entre diferentes niveles de laboreo debido a los cambios en la geología, la presencia de relleno (el relleno cementado proporciona alcalinidad y sulfatos al agua de drenaje), el período de exposición de las labores y el grado de inundación. Los geólogos y los ingenieros de minas deben identificar las diferencias existentes dentro de sus labores, pudiendo realizarse un programa de muestreo en la zona subterránea, en cada área o nivel, para identificar zonas específicas con problemas potenciales de agua que deben someterse regularmente a muestreo.

**Asuntos sobre la Calidad del Agua** Los principales problemas relacionados con el drenaje subterráneo incluyen:

- sólidos en suspensión y metales comunmente asociados;
- drenaje ácido; y
- en un menor grado, aceites, grasa y combustible de maquinaria, así como amoníaco y nitrógeno de voladuras y aguas negras o servidas.

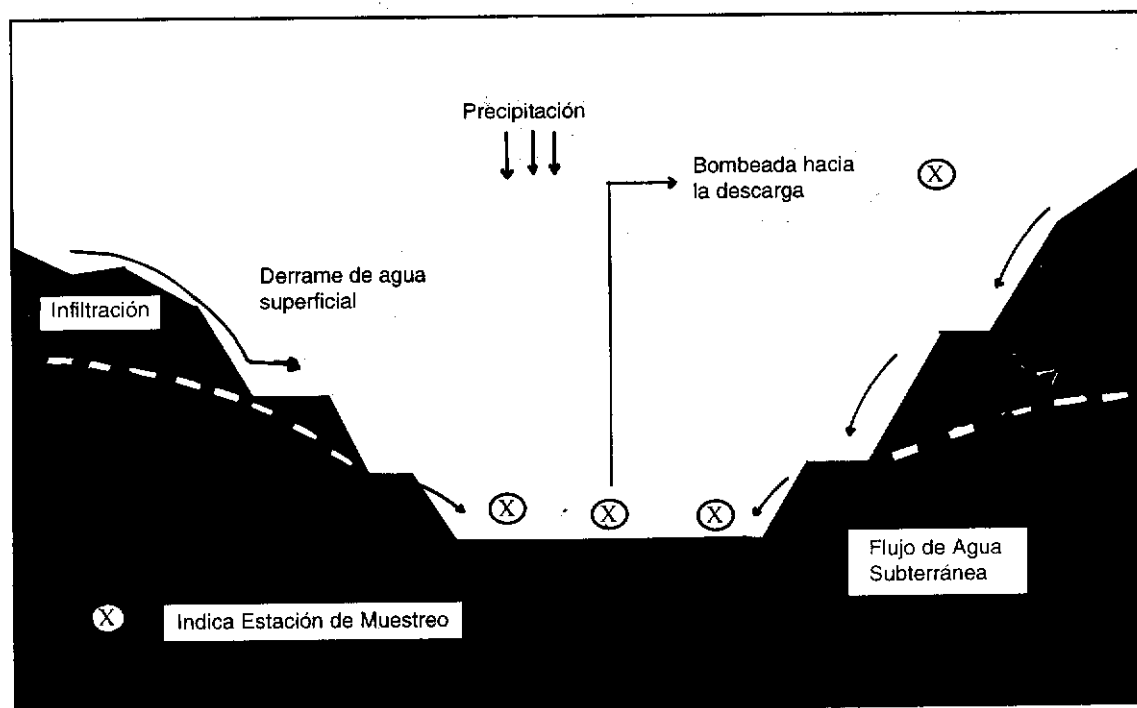
Los parámetros que típicamente se miden incluyen pH, Eh, conductividad, temperatura, sólidos totales en suspensión y un análisis de metales disueltos y/o totales seleccionados.

### 2.3.2 Tajos Abiertos

La principal fuente de agua que se registra en el tajo abierto es la precipitación pluvial y el flujo de agua superficial desde algún sistema de colección, con aportes potenciales de las aguas freáticas a través de fallas y fracturas. Por lo general, no existen fuentes discretas de agua hacia el tajo abierto que puedan ser monitoreadas con el fin de implementar una estación aguas arriba. El flujo que ingresa al tajo mediante las fallas y fracturas en la pared (ya sea de la superficie o del restablecimiento de aguas freáticas) será afectado por la calidad de las paredes de roca.

Esto se demuestra en el esquema de la Figura 2.3.

**Figura 2.3**  
**Esquema de Muestreo desde tajos abiertos**



Usualmente, el agua se elimina del tajo mediante bombeo.

Durante la operación, debe establecerse una estación de monitoreo en la descarga de la tubería que está bombeando agua del tajo. Alternativamente, el sumidero colector, ubicado en la parte inferior del tajo, puede usarse para muestreo, no obstante, esta estación cambiará mientras prosiga el desarrollo del tajo, lo que puede alterar la información sobre calidad del agua.

**Asuntos sobre la Calidad del Agua** Los principales problemas relacionados con el drenaje de tajo abierto incluyen:

- sólidos en suspensión y metales comúnmente asociados debido a las voladuras y



remoción de mineral y desechos;

- ♦ drenaje ácido de las paredes del tajo, roca de los alrededores y cualquier apilamiento de roca depositada en el tajo; y
- ♦ en un menor grado, amoníaco y nitrógeno de voladuras.

Los parámetros que típicamente se miden incluyen pH, Eh, conductividad, temperatura, sólidos totales en suspensión y un análisis de metales disueltos y/o totales seleccionados.

### 2.3.3 Apilamiento de Mineral de Desecho (Pilas o Botaderos)

La caracterización de la calidad de agua que drena de los botaderos puede ser una de las partes más difíciles de un programa de monitoreo. No obstante, en las minas con un problema de drenaje ácido, dentro de los que resaltan las minas de metales bases a tajo abierto, el drenaje es a menudo la única y mayor fuente de contaminantes que se dirige hacia el ambiente receptor.

Los minerales de desecho se producen en el desarrollo del tajo abierto, y en menor medida, en minas subterráneas. Usualmente, se apilan en botaderos en la superficie, pero también pueden utilizarse en la construcción de presas, cimientos y caminos. En esta sección, se trata sobre el monitoreo de las pilas de minerales de desecho; no obstante, el supervisor de asuntos ambientales debe estar consciente de la distribución de roca de desecho alrededor del área de influencia de la mina, para determinar si se requiere otros lugares de muestreo a fin de identificar las fuentes de contaminantes.

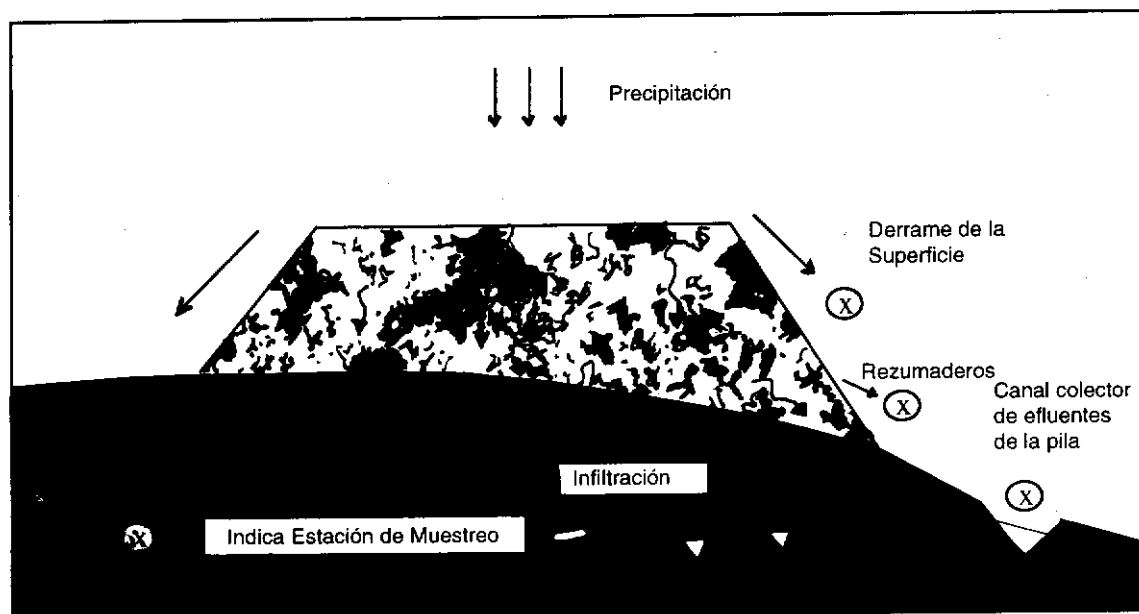
La dificultad en el monitoreo del drenaje de un apilamiento de mineral radica en que el flujo que ingresa o que sale del botadero se distribuye sobre una gran área, tal como se muestra en la Figura 2.4. Usualmente, la fuente de agua que entra en la pila es la precipitación en la forma de lluvia o nieve. Una parte de esta agua percolará dentro de la pila desde la superficie y los lados, mientras que otra parte se deslizará sobre la superficie de la pila. Si la pila se encuentra ubicada en un área topográfica baja, también puede haber un componente de flujo, a través de la base del botadero, que provenga de una corriente natural o un manantial de aguas freáticas.

El agua que sale de la pila puede fluir directamente a las aguas freáticas a través de la base de dicha pila y/o puede aparecer alrededor de toda la base de la pila como rezumaderos individuales. Si el drenaje de la pila se colecta en un canal o depresión topográfica natural, deberá establecerse la estación de muestreo dentro del canal lo más cerca posible a la pila.

Si el drenaje sale desde la pila en varios lugares, será necesario realizar un muestreo en dos etapas para identificar el (los) mejor(es) lugar(es):

- ☒ después de un período de grandes lluvias y durante condiciones «típicas», tome muestras de cada rezumadero principal para verificar tanto la calidad como la cantidad de agua; y

**Figura 2.4**  
**Esquema de Muestreo en pilas o Botaderos**



- ☒ de estos resultados, seleccione una o dos estaciones que representen mejor la calidad del agua que se registra en la mayoría de las muestras. Puede ser necesario construir un pequeño canal colector e instalar un vertedero en un área para tomar una muestra representativa y medir el flujo.

Deberá realizarse un reconocimiento anual de rezumaderos alrededor de la pila para asegurarse que el lugar de muestreo sigue siendo el más representativo en cuanto a calidad de drenaje de la pila.

Al transcurrir el tiempo, puede observarse una variabilidad considerable en las muestras de agua del drenaje de la pila y en diferentes áreas. Los botaderos constan de rocas de desecho gruesas con distintas características geológicas que originan diferentes comportamientos de lixiviación y calidad resultante de agua. Con el paso del tiempo, si la oxidación y la generación de ácido se inicia en una pila, la calidad del drenaje cambiará. En una escala de tiempo más corta, las fluctuaciones estacionales en las precipitaciones, temperatura y evaporación cambiarán la cantidad de agua que fluye a través de la pila y el alcance de los procesos de oxidación y disolución mineral. Un período de alto flujo, después de uno relativamente seco, puede dar como resultado un incremento en el lavado de contaminantes y en un mayor contenido de éstos en el drenaje.

**Asuntos sobre la Calidad del Agua** Los principales problemas relacionados con el drenaje

de rocas de desecho incluyen:

- lixiviación de metales solubles; y
- oxidación, generación de ácido y lixiviación de metales en el drenaje ácido.

Los parámetros que típicamente se miden incluyen pH, Eh, conductividad, sulfato, temperatura, hierro disuelto y un análisis de metales disueltos y/o totales seleccionados.

## 2.3.4 Relaves

El aspecto principal respecto a la calidad del agua es la descarga de sólidos en suspensión y de metales comunmente asociados en esta agua. Durante la operación, generalmente se presenta una descarga continua de agua de los embalses de relaves, ya sea por decantación o derrames. Los relaves están esencialmente saturados y son alcalinos.

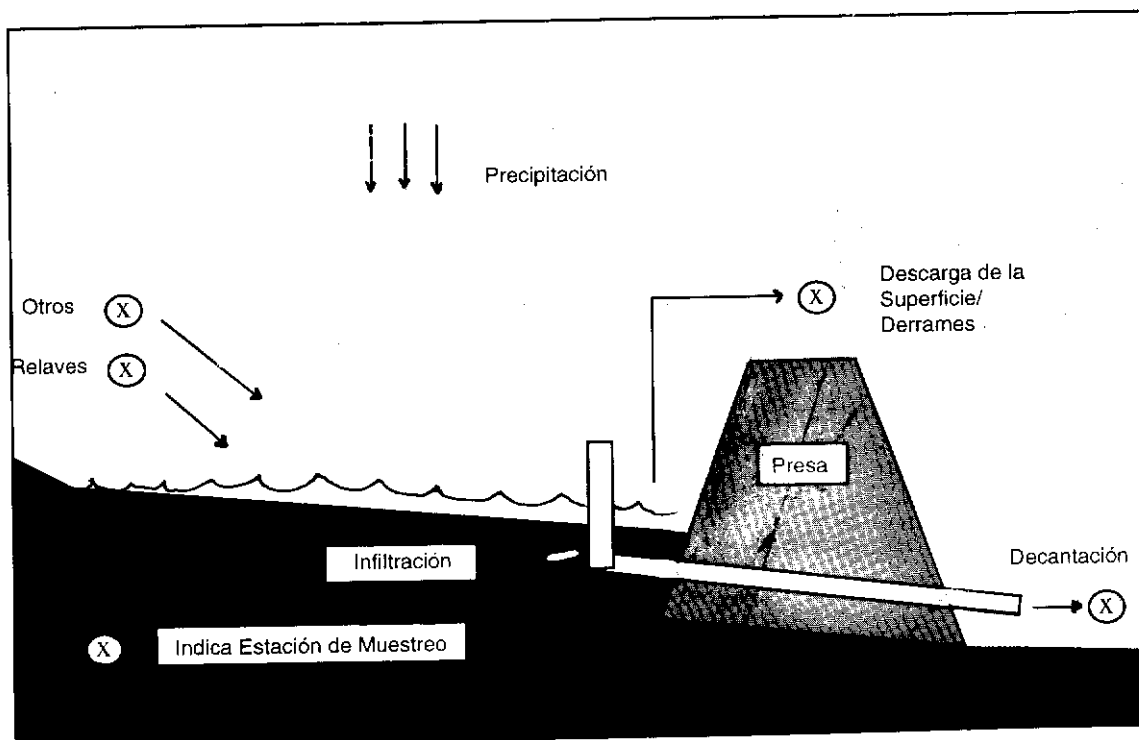
Después de que cesa la deposición en los embalses de relaves o si éstos se secan, el potencial para la oxidación, generación de ácido y drenaje de ácido a partir de masas de relaves sulfurados constituye el principal problema de calidad de agua. De este modo, los objetivos del monitoreo de la calidad de agua de embalses de relaves son:

- definir el afluente de agua y contaminantes asociados a los relaves;
- cuantificar la liberación de sólidos en suspensión y metales en el agua de decantación;
- identificar cualquier cambio que se produzca en la calidad del agua de las pozas de relaves neutras que indiquen que puede estar iniciándose una generación de ácido; o
- cuantificar la carga de contaminante a partir de la generación de ácido e identificar la necesidad de control de la calidad de agua o evaluar la efectividad de las medidas de control.

La fuente principal de agua que va hacia los embalses de relaves es usualmente el agua del proceso contenida en la pulpa de relaves, tal como se muestra en la Figura 2.6. Además, puede haber aportes de:

- ❖ cursos naturales de agua, ya que los embalses de relaves normalmente se encuentran ubicados en áreas topográficas bajas;
- ❖ instalaciones para relaves aguas arriba;
- ❖ drenaje de pilas de desecho cercanas;
- ❖ agua bombeada desde las labores de la mina, ya que la poza de relaves puede utilizarse como poza de sedimentación;
- ❖ aguas residuales de poblados aledaños o campamentos.

**Figura 2.5**  
**Esquema de Muestreo en Embalses de Relaves**



Cada fuente de aporte debe identificarse y muestrearse. La descarga de los embalses de relaves debe someterse a muestreo regularmente. La mayor parte del agua de los embalses de relaves se descarga desde la superficie, en lugar de hacerlo hacia las aguas freáticas, debido a la permeabilidad relativamente baja de los sólidos que constituyen los relaves. Por lo tanto, es necesaria una estación de muestreo de aguas superficiales.

**Asuntos sobre la Calidad del Agua** Los principales problemas relacionados con el drenaje de embalses de relaves incluyen:

- sólidos en suspensión y metales disueltos comunmente asociados con el agua del proceso (durante la operación);
- reactivos de procesamiento, como el cianuro;
- generación de ácido y lixiviación de metales a más largo plazo.

Además, debe identificarse los contaminantes que se presentan en las aguas de relaves provenientes de otras fuentes (según se enumera líneas arriba). La eliminación alternativa de estos drenajes puede resultar en una mejora en la calidad del agua de descarga de relaves.

Los parámetros que típicamente se miden incluyen pH, Eh, conductividad, sulfato, temperatura,

hierro disuelto y un análisis de metales disueltos y/o totales seleccionados. Puede requerirse parámetros que sean específicos en relación con los otros aportes a la poza de relaves, por ejemplo, amoníaco si se agrega aguas servidas.

### 2.3.5 Concentradora e Instalaciones de Procesamiento

Generalmente, el monitoreo de las instalaciones de procesamiento se realiza únicamente durante la operación. Después del cierre y del desmantelamiento de construcciones, tanques de almacenamiento (para reactivos, combustibles, etc.) o de contención de minerales, las instalaciones ya no están operativas, por lo que el monitoreo sólo se requeriría en caso de cualquier derrame que se presentara en el área de edificaciones.

Las instalaciones de procesamiento incluyen la(s) concentradora(s), refinera, fundición y otras áreas de almacenamiento relacionadas con productos y subproductos metalúrgicos y residuos. El agua que se descarga de la concentradora generalmente se dirige a los embalses de relaves. Asimismo, puede haber una descarga de aguas residuales (incluyendo aguas servidas) desde la planta, las mismas que deben muestrearse. Una fundición producirá más corrientes de aguas de desecho (incluyendo aguas servidas); no obstante, los principios de muestreo son los mismos: medir la calidad y cantidad de cada corriente de aguas de desecho o residuales.

El muestreo del agua de los relaves se expone líneas arriba. Si hubiera un espesador de relaves, también deberá extraerse regularmente muestras de:

- ♦ «overflow» del espesador, particularmente si éste se descarga directamente al medio ambiente;
- ♦ agua de alimentación al espesador (muestra de pulpa filtrada); y
- ♦ «underflow» del espesador (muestra de pulpa filtrada).

Con frecuencia estas corrientes se muestrean, diaria o semanalmente, como parte de la evaluación metalúrgica. Sin embargo, las muestras de calidad de agua también deben tomarse y analizarse como parte del programa de muestreo de aguas ambientales.

### 2.3.6 Infraestructura e Instalaciones

Existe una variedad de otras instalaciones requeridas para la operación de la mina y que puede aportar contaminantes a las aguas superficiales. Tales instalaciones pueden incluir:

- ❖ poblados aledaños y/o campamentos
- ❖ extremos de carriles y otras instalaciones de descarga de concentrados;

- ❖ manejo de agua;
- ❖ almacenamiento de combustible y petróleo;
- ❖ almacenamiento de reactivos;
- ❖ vaciaderos de basura y terraplenes;
- ❖ áreas de derrames, incluyendo reactivos, químicos, relaves o combustibles que no han sido vaciados;
- ❖ caminos, represas de suministro de agua, vías férreas; y
- ❖ labores mineras abandonadas y estructuras relacionadas.

Estos deben identificarse, debiendo ubicarse las estaciones de muestreo según sea necesario. Mientras que la necesidad de una estación es específica por lugar, como regla general se tiene:

- debe muestrearse regularmente cualquier flujo de agua o fuente de contaminación importantes que intervienen en el balance de agua de la mina;
- debe realizarse un reconocimiento de rezumaderos (un muestreo más completo e intenso de un área determinada), a fin de localizar cualquier fuente de contaminantes e identificar la necesidad para efectuar un muestreo regularmente;
- tomar una muestra si se tiene dudas.

### 2.3.7 Medio Ambiente Receptor

El motivo para realizar el muestreo y el monitoreo de la calidad del agua es garantizar la protección del medio ambiente natural local. El medio ambiente receptor de aguas superficiales en el área de influencia de una mina se refiere a todos los cursos naturales de agua que dicha mina afecta. Generalmente, estos son los ríos superficiales, corrientes, lagos o tierras pantanosas en el área. El flujo de aguas freáticas dará su aporte a los mencionados cursos de agua. Sin embargo, si los componentes de la mina referidos anteriormente se muestrean como se describe, la mayoría de aportes a las aguas freáticas podrá caracterizarse adecuadamente.

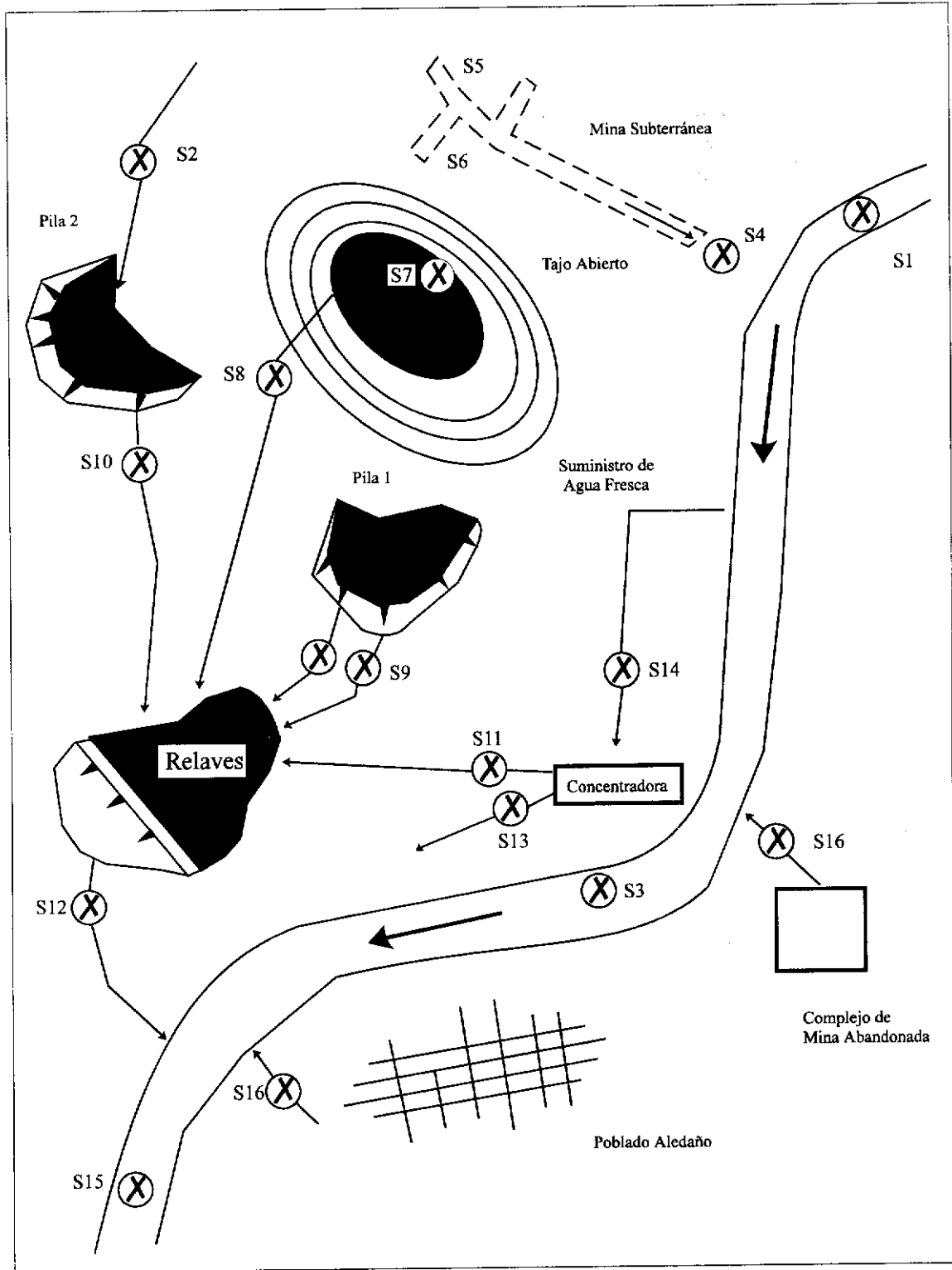
En cada curso de agua importante debe existir una estación de muestreo aguas arriba y aguas abajo con relación a la mina.

Lo anterior es decisivo para determinar:

- ♦ cuáles son las condiciones naturales o de «base» para el curso de agua;
- ♦ si la mina está aportando contaminantes a las aguas naturales;
- ♦ si existen otras fuentes de contaminantes, ya sea naturales o antropogénicas; y
- ♦ hasta qué nivel se necesita controlar la descarga de contaminante desde la mina.

Todos los parámetros que se miden en la(s) fuente(s) deben medirse en el medio ambiente receptor. Además, debe realizarse una serie completa de análisis en las muestras extraídas aguas arriba para caracterizar las condiciones de base.

**Figura 2.1**  
**Esquema de las Estaciones de Muestreo en el área de influencia**  
**de una mina (actividad minera)**





**Cuadro 2.1**  
**ESTACIONES DE MUESTREO**

Componente	Flujo de Entrada	Estaciones	Flujo de Salida	Estaciones	Total	Flujo de Entradas
cursos de aguas naturales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aguas arriba</li> </ul>	S1, S2	aguas abajo	S3, S15	3	trim./cada dos semanas
subterráneo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aguas freáticas en dos niveles</li> <li>• bombeado de la superficie para perforación</li> </ul>	S5, S6 1	descarga bombeada a la superficie	S4	3	trim./cada dos semanas
tajo abierto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• precipitación</li> <li>• aguas freáticas a traves de fallas</li> </ul>	S7	bombeado a los relaves	S8	2	mens./ mens.
pila de roca 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• precipitación</li> </ul>	-	flujo difuso a los relaves	S19(1-3)	1	estac./mens. y estac
pila de roca 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• precipitación corriente</li> </ul>	S2	corriente	S10	2	
relaves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pulpa de relaves</li> <li>• corriente 1</li> <li>• tajo abierto</li> <li>• roca de desecho 1</li> <li>• precipitación</li> </ul>	S11 S10 S8 S9(1-3)	decantación	S12	2	diario para la pulpa semanal para la decantación los demás meses
procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• agua fresca</li> </ul>	S14	relaves, aguas servidas desperdicios, etc.	S11 S13	2	mens./diario a cada dos semanas
infraestructura e instalaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• subterráneo antiguo</li> <li>• población aledaña, campamento</li> </ul>			S14 S17	1	trim diario a mensual

La frecuencia proporciona un ejemplo de un programa de monitoreo. Esto debe modificarse, a fin de acordar la variabilidad de cada lugar.

## 3.0 ANALISIS DE LA CALIDAD DE AGUA

### 3.1 Parámetros

En la evaluación de la química, los parámetros típicos de monitoreo pueden describirse en dos grupos principales:

- ❖ parámetros orgánicos
- ❖ parámetros inorgánicos.

Para comodidad al proporcionar información sobre resultados analíticos, con frecuencia dichos parámetros se describen en los siguientes términos:

#### Parámetros Inorgánicos

- ◆ **físicos** incluyen los sólidos totales en suspensión (o turbidez), temperatura, flujo, color, olor y sabor. Por conveniencia, el pH, Eh, conductividad, sólidos totales disueltos y oxígeno disuelto algunas veces se reportan con los parámetros físicos;
- ◆ **iones principales**, incluyendo sulfato, alcalinidad, acidez, cianuro y nutrientes tales como las especies de nitrógeno y fosfatos;
- ◆ **metales disueltos** que incluyen todos los iones metálicos cuyo tamaño de partícula sea menor de 0,45  $\mu\text{m}$  (por ejemplo, del análisis de una muestra filtrada mediante un filtro de 0,45  $\mu\text{m}$  de abertura); y
- ◆ **metales totales** que incluyen todos los iones metálicos en una muestra no filtrada.

Los **Parámetros Orgánicos** incluyen componentes de reactivos de procesamiento, fenol, petróleo y grasa, etc.

Algunos parámetros se usan directamente para evaluar el impacto ambiental o la toxicidad del agua, ya sea para la salud humana, recursos acuáticos o para uso agrícola. Estos parámetros incluyen principalmente metales totales y disueltos, cianuro y iones principales como el amoníaco.

Otros parámetros son menos tóxicos pero proporcionan una indicación útil de la química del

agua y el potencial de un problema sobre su calidad. Los cambios en los parámetros, tales como sulfato, alcalinidad, acidez, conductividad y hierro disuelto pueden indicar el inicio de procesos de oxidación y de generación de ácido antes de que el proceso se desarrolle hasta el punto de liberar un drenaje de pH ácido con altas cargas de metal disuelto.

Algunos parámetros determinados deben medirse en todos los lugares de muestreo y para la mayoría de muestras. Estos se denominan **parámetros básicos**. Los parámetros básicos pueden incluir pH, Eh, temperatura, conductividad, alcalinidad/acidez y sólidos totales disueltos (TDS) y sólidos totales en suspensión (TSS).

Dependiendo de la geología de la mina y de los reactivos que se usan en el procesamiento, algunas mediciones son más apropiadas que otras. Estos **parámetros específicos por lugar** se seleccionan de una lista completa de metales, iones principales y orgánicos.

Por ejemplo, mientras la mayoría de muestras de agua deben analizarse para determinar el contenido de metales, los metales específicos dependerán del lugar o sitio. En una mina de metales bases, el muestreo regular incluiría todos los metales detectados sobre el nivel de trazas en el mineral y en el desecho. Con menor frecuencia, se efectuaría el análisis de la serie completa de metales. Sin embargo, en un yacimiento de oro en roca carbonácea o cuarzo, sin minerales sulfurados, el énfasis del monitoreo radicaría en el cianuro (dependiendo del procesamiento), alcalinidad, sólo con análisis periódicos de metales.

Es importante reconocer que no todos los parámetros deben medirse en cada muestra - la selección dependerá de la variabilidad del parámetro en la muestra de agua (la variabilidad más alta generalmente requiere de un análisis más frecuente), el nivel del problema asociado con los parámetros y el componente que se somete a muestreo.

En el Cuadro 3.1 se proporciona una guía general para la selección de parámetros. Estos parámetros son principalmente aquellos que se analizan para la protección de la vida acuática. Este cuadro resumen puede servir de ayuda al supervisor de asuntos ambientales en el diseño del programa de muestreo inicial. Sin embargo, el supervisor debe seleccionar los parámetros específicos apropiados para la mina, basado en el entendimiento de la geología, método de explotación, procesamientos químicos, manejo de aguas residuales y datos de muestreo de agua realizados anteriormente en dicha propiedad. Las autoridades reguladoras (DGAA) también pueden proporcionar una exposición más detallada sobre la selección de parámetros y la frecuencia de monitoreo.

Para seleccionar los parámetros básicos y los específicos por lugar que se incluirán en el programa de monitoreo regular, se procederá de la siguiente forma:

- Evalúe los datos existentes, a la fecha, para identificar todos los parámetros

detectados al monitorear el área de influencia de la mina.

- Identifique el uso de las aguas abajo (agua para consumo humano, uso agrícola, vida acuática, etc) para determinar los parámetros de interés específico. Inicialmente, analice una serie completa de parámetros en un número limitado de muestras de agua de descarga y receptora de efluentes.
- Revise la geología para identificar el potencial de generación de ácido y todos los metales contenidos en los minerales/desechos. Identifique aquellos presentes en sólo cantidades de trazas, ya que podría requerirse análisis de bajos niveles para detectar la presencia de estos metales en las muestras de agua.
- Enumere todos los químicos o reactivos utilizados en el procesamiento o laboreo de minas (por ejemplo, cianuro, cemento en el relleno, lixiviación ácida, etc.) y los posibles problemas relacionados con la calidad del agua (por ejemplo, especies CN, sulfato, acidez y metales, respectivamente).
- Usando el Cuadro 3.1 como una guía, identifique todos los elementos básicos y específicos por lugar que deben monitorearse. De los parámetros básicos, algunos se muestran como «regulares», lo que significa que se miden típicamente para todos los lugares y estaciones. Es posible que otros parámetros básicos no sean necesarios para todas las muestras y en todas las estaciones, pero, por lo menos, en la mitad de las muestras tomadas en la estación deben medirse.
- Revise este resumen con la entidad reguladora en las primeras etapas del programa de monitoreo.
- Revise la lista cada 4 ó 6 meses con los resultados más recientes del monitoreo para determinar si se necesita parámetros adicionales o variar la frecuencia de muestreo o si alguno de los parámetros debe suprimirse o analizarse con menor frecuencia.

# Análisis de la calidad de agua

**Cuadro 3.1**  
**Selección de Parámetros**

Parámetros	Parámetros Básicos		Parámetros específicos por lugar
	regulares	seleccionados	
<b>Inorgánico - Físico</b>			
flujo	x		
ph	x		
Eh		x	
temperatura	x		
conductividad	x		
TSS		x	
<b>Inorgánico - Iones principales</b>			
alcalinidad / acidez		x	
cianuro			x
oxígeno disuelto		x	x
dureza		x	
nitrógeno		x	
sulfato	x		
TDS	x		
<b>Inorgánico - Metales</b>			
Serie - Total (ICP)		x	
metales específicos (AA)			x
límite bajo de detección para metales específicos, p. ej. As, Hg, Th, etc.		x	
carbono inorgánico disuelto			x
<b>Orgánicos</b>			
petróleo y grasa		x	
carbón orgánico			x
biológico			x

NOTAS: El I.C.P. es un análisis de Plasma por inducción (capaz de analizar una serie de hasta 32 metales). AA e refiere a la espectroscopia de Absorción Atómica.

## 3.2 Frecuencia

### 3.2.1 Monitoreo Regular para Caracterización Inicial

El cronograma de muestreo y análisis en cada área de influencia de una mina depende de las cartas hidrográficas de dicho lugar y del programa de manejo de aguas, así como de la etapa de operación (por ejemplo, desarrollo, operación, cierre). No obstante, para la caracterización inicial de una mina, antes del establecimiento de requisitos reguladores, existen algunos aspectos comunes:

- ✦ todas las descargas de la mina al medio ambiente receptor debe someterse regularmente a muestreo y análisis;
- ✦ todos los flujos ingresantes de agua a la propiedad deben someterse a muestreo para determinar las condiciones promedio y máximas que faciliten los cálculos totales de carga de contaminantes;
- ✦ el muestreo debe ser más frecuente durante e inmediatamente después de un evento fuera de control, por ejemplo, derrame de reactivo, derrame de relaves, falla en la presa, etc.
- ✦ el muestreo debe ser más frecuente antes, durante e inmediatamente después de un cambio en el procesamiento, manejo de agua o de desechos si es que existe un impacto en la calidad del agua receptora de este cambio;
- ✦ durante el primer año de monitoreo regular, el muestreo debe ser más frecuente durante eventos máximos o extremos, a fin de identificar las condiciones máximas y promedio y seleccionar la frecuencia y tipo de muestreo apropiado para los años futuros. Es común ver una carga máxima en el drenaje de una pila o botadero en los primeros días de lluvia después de un largo período seco. El muestreo de este drenaje el primer día y en los posteriores días de lluvia puede resultar en una diferencia de un orden de magnitud en las concentraciones metálicas en ese corto período de tiempo, en casos extremos; puede establecerse esta variabilidad para seleccionar intervalos de muestreo representativo.

En general:

- el monitoreo regular se realiza semanal o mensualmente;
- el muestreo adicional (diaria o semanalmente) se realiza durante períodos de

cambio, por ejemplo, deshielo, fuertes lluvias, cambio en el flujo de descarga, cambio en el procesamiento o laboreo de minas;

Para establecer la frecuencia y el tiempo apropiado para el lugar o sitio individual:

- Revise los datos existentes para cuantificar la variabilidad con el transcurso del tiempo.
- Identifique las condiciones de flujo máximas y promedio para todas las corrientes de agua que se muestran en el plano del área de influencia de la mina (tal como se expone en el Capítulo 2). Esto incluirá la preparación de una carta hidrográfica del lugar donde se muestre la precipitación e infiltración sobre una base mensual.
- Prepare un gráfico similar de flujos durante un año para todas las corrientes de efluentes provenientes de la mina y de la concentradora.
- Identifique los componentes para los que se producen cambios en el balance de agua y carga de contaminantes durante el año. Observe que algunos componentes, en relación con otros, mostrarán un mayor cambio con las influencias estacionales. Por ejemplo, el balance de agua del apilamiento de desechos está directamente relacionada con el régimen climático, mientras que el balance de agua alrededor de la concentradora es relativamente constante durante todo el año, sin considerar los cambios en el procesamiento.
- Para cualquier componente o corriente para los cuales no se conoce la variabilidad temporal, lleve a cabo un programa de muestreo de gran intensidad a corto plazo, por ejemplo, efectúe el muestreo cada dos días durante un período de dos semanas.
- Esté preparado para cambiar la frecuencia de muestreo en respuesta a los datos o a las observaciones de campo. Es mejor muestrear inicialmente con mayor frecuencia, identificar todas las variables y luego disminuir la frecuencia del muestreo en forma apropiada.

### 3.2.2 Etapa de Operación

#### Desarrollo

Durante la etapa de preparación de mina o de desarrollo, el objetivo del monitoreo radica en la identificación de las condiciones de «base» o «de referencia», esto es, la calidad del

agua que existe antes de la actividad minera actualmente propuesta. La etapa de desarrollo puede ser para una mina nueva o para el desarrollo de una nueva área en una operación minera existente; por ejemplo, una nueva área de almacenamiento de relaves.

El término «base» usualmente se refiere a condiciones no afectadas por el laboreo de minas y puede medirse en un área o zona representativa aguas arriba de la propiedad minera para las operaciones existentes. Las condiciones «de referencia» se refieren a aquellas medidas in situ en un punto específico en el tiempo. De este modo, para el desarrollo de una mina nueva en un área minera antigua, las condiciones de línea de referencia son las que se miden antes de cualquier actividad de desarrollo (aunque el laboreo de minas efectuado previamente en el área puede afectar las condiciones). En esta misma área, las condiciones de base podrían ser aquellas medidas aguas arriba de la mina, en un área representativa que no ha sido afectada por las labores mineras. Las condiciones de base y/o de referencia definidas son aquellas con las que se comparará la calidad del agua durante la operación, a fin de determinar si ha habido impacto del laboreo en la mencionada calidad del agua. Estas también son las condiciones a partir de las cuales se definirá cualquier requisito de calidad del agua al cierre de la mina.

El monitoreo durante el predesarrollo usualmente requiere, por lo menos, de un programa de muestreo de un año de duración de todos los cursos de aguas superficiales para identificar las condiciones promedio y máximas de flujo y calidad del agua. Si el personal familiarizado con el área prevé que el año elegido representará condiciones extremas o si ello se determina, por comparación con los registros existentes, es prudente que se efectúe un muestreo adicional para asegurar de que se establece un nivel referencial representativo.

Se debe realizar una serie completa de análisis de calidad del agua para cada estación, con miras a proporcionar un nivel de referencia completo. Asimismo, durante este período podrá realizarse otros estudios, incluyendo monitoreo de precipitación y clima, monitoreo de aguas freáticas, evaluaciones biológicas y muestreo de sedimento.

## **Operación**

El objetivo del monitoreo durante la operación encierra dos aspectos:

- caracterización inicial (tal como se expone en este documento) a fin de definir la química del agua para todos los flujos asociados con la mina, proporcionar una base con el propósito de determinar objetivos razonables referentes a la calidad del agua y mejorar el programa de monitoreo regular a largo plazo y,
- controlar la calidad del agua de efluentes y el impacto ambiental monitoreando la calidad del agua de la mina, asegurando que se cumple con los objetivos de





calidad e identificando las fuentes de contaminantes a largo plazo (tales como el drenaje ácido).

De este modo, durante la operación se establece las estaciones de muestreo para todos los componentes de la mina. Las estaciones se monitorean en forma regular, por lo general, semanal o mensualmente, realizándose monitoreos diarios a las corrientes del proceso, como los relaves de la planta. Las estaciones, con calidad de efluente altamente variable, se monitorean con mayor frecuencia que las estaciones con calidad de efluente razonablemente constantes. En las primeras etapas de un programa de monitoreo, debe monitorearse exhaustivamente durante un período corto las estaciones para las que se espera variabilidad en la calidad del agua, a fin de establecer las condiciones extremas y promedio y seleccionar la frecuencia de muestreo apropiada.

Tal como se muestra en el Cuadro 2.1, existen ciertos parámetros básicos que pueden medirse para todos los lugares, incluyendo parámetros tales como pH, temperatura, flujo. La selección de metales específicos y otros parámetros para monitorear dependerá de la geología de la mina, de los parámetros de importancia en el medio ambiente receptor y de la fuente de agua. De los datos obtenidos, durante por lo menos un año y con experiencia, los programas pueden ser modificados para ser más efectivos en términos de costos; para obtener más información a partir de la toma de menor número de muestras.

## Cierre

Generalmente, al cierre de un componente de la mina o del total de ésta, la frecuencia del monitoreo disminuye durante un período de uno a cinco años después de la desactivación de las operaciones. El objetivo del monitoreo durante este período encierra dos aspectos, bien para:

-  demostrar que no existen fuentes de contaminantes que se activen a largo plazo como resultado del laboreo de minas o actividades de desactivación de la operación; o
-  demostrar la efectividad de las medidas de control para limitar o evitar la liberación de contaminantes a las aguas superficiales.

En una mina donde no se han identificado problemas en la calidad del agua durante la operación, el programa de monitoreo correspondiente a la misma se reducirá en gran escala. La duración del monitoreo será suficiente para evaluar los efectos sobre la calidad del agua de cualquier operación de desactivación. Generalmente, esto no dura más de uno a tres años después del cierre y se centra en el medio ambiente receptor. Para una mina en la que existe preocupación

en cuanto a la calidad del agua que drena de uno o más componentes, el monitoreo se centrará en éstos y en el medio ambiente receptor, por lo general, de tres a cinco años. Si se implementan mediciones para controlar la calidad del drenaje, se establecerán las estaciones de muestreo y la frecuencia del monitoreo para evaluar la efectividad de tales controles o medidas.

La compañía que ha venido operando y las autoridades reguladoras determinarán el programa de monitoreo después del cierre para asegurar razonablemente la protección ambiental.

Se reconoce que después del cierre, el acceso seguro a las diferentes partes de la mina puede limitar la frecuencia del monitoreo. Este monitoreo establecerá un nuevo «nivel de referencia» para el área anterior de la mina.

En una mina antigua, abandonada, el objetivo del programa de monitoreo de la calidad de agua es caracterizar la carga de contaminante y cualquier requisito necesario para el control de dicha calidad de agua, según se ha expuesto para las minas en operación.

## 4.0 MUESTREO DE CAMPO

### 4.1 Introducción

Para tomar muestras útiles y representativas se requiere poner gran atención a los protocolos detallados y estandarizados. Estas muestras se utilizarán finalmente para determinar la eficiencia del sistema de manejo de agua, evaluar el impacto ambiental de la mina en los alrededores y establecer una política reguladora.

En estos términos, deberá seguirse firme y cuidadosamente cada paso en el programa de campo. Este capítulo ayudará al personal responsable de los asuntos ambientales a establecer los protocolos apropiados para el lugar o sitio, orientando a los siguientes tópicos:

- preparación para el viaje de campo;
- observación de la estación;
- toma de muestras;
- mediciones de campo;
- filtrado y conservación de muestras; y
- rotulado y embarque.

### 4.2 Preparación

En la preparación de un viaje de muestreo, deberá limpiarse y calibrarse todo el equipo; los reactivos y soluciones buffer deberán estar frescos y completos, los recipientes de muestreo ordenados (limpiados de acuerdo a los procedimientos estándar).

Todo el equipo necesario para muestreo de campo deberá mantenerse en un área limpia, destinada para tal fin, que no se use para otro muestreo en la mina. Este equipo generalmente incluye:

- medidores de campo, baterías, copias de manuales (los manuales originales deberán mantenerse archivados en la oficina), así como reactivos y otros productos químicos, incluyendo soluciones buffer (de pH) frescas;
- planos de la mina, mapas, hojas de datos de campo y los pases requeridos para tener acceso a las áreas restringidas, en caso necesario.
- los recipientes de muestreo (incluyendo hasta 3 juegos extras), aparatos de filtro (con repuestos), recipiente para hielo o enfriador, rótulos, bolsas plásticas,

guantes, pipetas, marcadores a prueba de agua; cronómetro para cálculo o estimación del flujo;

- agua destilada y recipientes limpios para mediciones de campo y soluciones buffer; y
- equipo de tomas exteriores incluyendo muestreadores, botas, sogas, estacas y/o cinta de referencia para marcar estaciones de muestreo adicionales o temporales y caja de herramientas.

Como mínimo, la lista de equipo básico deberá incluir un potenciómetro de campo (mide pH/Eh), termómetro, cronómetro, recipientes de muestreo, aparatos de filtro, ácido nítrico y pipeta, plano del sitio minero, hojas de registro de datos y otras facilidades menores.

Debe establecerse un cronograma de muestreo al inicio del programa de monitoreo. Todo arreglo especial para el transporte y acceso a áreas restringidas deberá hacerse con los supervisores. El técnico también deberá revisar los datos previos y las notas de campo con el personal de asuntos ambientales para asegurar de que se ha ordenado la ejecución de los cambios necesarios al programa.

**Cuadro 4.1**  
**Lavado de botellas y aplicación de solución preservante**

Parámetro	Recipiente	Proc. de Lavado	Preservación Temp. Química	Almacenamiento Máximo
Físicos y mayoría de los iones principales	100 mL polietileno	Lavado ácido	ninguna 4 C.	24h
Especies de nitrógeno, carbono orgánico amoniaco	250 mL polietileno	Lavado ácido	Ninguna 4 C.	24h
Fósforo total	Vaso de 250 mL	Lavado ácido	Ninguna 4 C.	1 mes
Plata	250 mL polietileno (ámbar)	Lavado ácido	0,4 g disodio EDTA/100mL 4 C.	10 días
Mercurio	Vaso de 100 mL	Lavado ácido	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	1 mes
Metales totales	500 mL polietileno	Lavado ácido	pH 2 con HNO <sub>3</sub> 4 C.	6 meses
Metales disueltos	500 mL polietileno	Lavado ácido	pH 2 con HNO <sub>3</sub>	

A menos que se establezca de otro modo, por el término "lavado con ácidos" se entenderá la siguiente secuencia de lavado: enjuague 3 veces con agua corriente limpia, filtrada o agua destilada, enjuague 1 vez con ácido crómico, luego enjuague 3 veces con agua, 1 vez con ácido nítrico y finalmente, con agua destilada.

## 4.2.1 Equipo

Para garantizar la calidad de las muestras, deberá limpiarse todo el equipo al finalizar el viaje de muestreo y mantenerse en óptimo estado de limpieza y en buenas condiciones de funcionamiento. Deberá tenerse un registro de mantenimiento de cada instrumento, a fin de anotar el mantenimiento del equipo, reemplazo de sondas o electrodos, reemplazo de baterías y cualquier problema o lecturas o calibraciones irregulares encontradas al usar las sondas o electrodos. Es prudente verificar que cada instrumento cumpla con los estándares de calibración antes de ir al campo.

### Recipientes de Muestras de Agua

La calidad de los datos de muestreo de agua depende en gran medida de la integridad de las muestras. El técnico de campo y el personal del laboratorio deberán tomar precauciones contra la contaminación de muestras, seleccionando los recipientes apropiados, lavándolos y manipulándolos adecuadamente para evitarla. Los procedimientos que se sugieren se enumeran en el Cuadro 4.1 (de Environment Canada, 1983; U.S. EPA, 1993). Los recipientes de muestra de agua pueden volverse a usar si se lavan adecuadamente. No es recomendable usar botellas donde hayan estado almacenados químicos o reactivos concentrados debido al riesgo de contaminación.

Los recipientes deben almacenarse y transportarse al campo en un contenedor limpio, libre de polvo, tal como un enfriador (caja acondicionada térmicamente). El humo de cigarro, los derrames de combustible, la grasa y el humo de tubo de escape pueden contaminar las muestras.

El volumen de muestra requerido para análisis de diferentes parámetros puede variar según los laboratorios. En general, para el análisis de aguas superficiales que provienen de una estación de muestreo son suficientes tres recipientes:

- ❖ un recipiente de 1L de muestra no filtrada, no preservada, para el análisis de parámetros físicos y la mayoría de iones principales;
- ❖ un recipiente de 500mL de muestra no filtrada, no preservada, para el análisis de metales totales y sólidos totales disueltos; y
- ❖ un recipiente de 500 mL de muestra filtrada, preservada, para el análisis de metales disueltos.

Puede requerirse muestras adicionales para el análisis de orgánicos o reactivos, tales como cianuro. El laboratorio de análisis proporcionará información sobre la preservación apropiada.

A menudo, el laboratorio también proporcionará botellas de muestra que han sido lavadas y, algunas veces, a las que se les ha aplicado soluciones preservantes, aunque esto puede realizarse fácilmente en el campo.

## 4.2.2 Instrumentos Analíticos

Algunas sondas o electrodos manuales tipo «bolígrafo» están disponibles para las mediciones de campo de parámetros, tales como pH, Eh, temperatura, conductividad y TDS. Estos pueden utilizarse para observaciones de campo y programas de reconocimiento. No obstante, la calibración de estas sondas debe verificarse frecuentemente para determinar si tienen la exactitud y precisión de los instrumentos de laboratorio. Por lo general, los fabricantes harán mención de la exactitud de cada instrumento.

Los instrumentos portátiles están disponibles para medir parámetros de campo en la estación de muestreo. Estos parámetros incluyen algunos o todos, a saber: Eh, pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y turbidez. Algunos proveedores de instrumentos tienen a disposición juegos de campo para las mediciones de sulfato, alcalinidad, acidez y dureza. No obstante, por lo general, el laboratorio de análisis mide estos últimos parámetros.

Las mediciones de flujo usualmente requieren la instalación de un vertedero en los lugares de flujos mayores. Se requerirá un cronómetro y, posiblemente, un calibrador de profundidad o varilla de medición.

## 4.3 Tipos de Muestras

El tipo de muestra a tomarse de un cuerpo superficial de agua se determinará considerando las características de la estación de muestreo y el flujo de agua; asimismo, la velocidad de flujo, tamaño o área de la masa de agua, homogeneidad, clima, flujo discreto o distribuido y los requisitos de precisión. Además, deberá considerarse el tipo de equipo que está disponible y la seguridad del técnico durante la toma de muestras.

**Muestras tomadas al azar (puntuales)** El tipo de muestra más común para el monitoreo regular de las aguas superficiales en la mina es una muestra «tomada al azar o puntual». La muestra se colecta en determinado momento y lugar en el recorrido del flujo de agua. Las muestras tomadas al azar en un río o poza también pueden tomarse en puntos separados sobre la profundidad en la columna de agua.

**Muestras compuestas** Se puede preparar muestras compuestas en un intervalo de tiempo discreto, extraídas de un lugar de muestreo seleccionado, a fin de determinar las condiciones «promedio». Puede obtenerse una muestra compuesta, ya sea por recolección continua, en un intervalo de tiempo, de una corriente de flujo bajo (muestra compuesta de un día de un

rezumadero de bajo flujo) o mezclando volúmenes recolectados a intervalos mayores sobre un período de tiempo de un flujo de descarga elevado (muestra compuesta de 24 horas colectada a partir de muestras individuales, cada hora, desde una tubería de relaves).

No es aceptable juntar muestras compuestas de dos lugares diferentes debido a los cambios potenciales en la química del agua resultantes del mezclado de dichas muestras. Para calcular la composición promedio de agua a lo largo de una gran área, las muestras individuales deben analizarse y promediarse matemáticamente o usando un modelo geoquímico de mezcla.

#### **4.4 Garantía de Calidad (QA)/Control de Calidad (QC) en las Mediciones de Campo**

Por los términos «garantía de calidad» y «control de calidad» se entenderá los procedimientos y análisis aplicados para garantizar la buena calidad de los datos de muestreo de calidad del agua. La garantía de calidad (QA) se refiere a los estándares a seguirse sobre los procedimientos y reactivos. Las muestras de control de calidad (QC) se colectan específicamente para evaluar la integridad del muestreo y el análisis.

Para garantizar la calidad de las muestras y de los datos, deberá seguirse procedimientos estándar para asegurar el control de calidad en el campo. En algunos casos las condiciones requerirán un cambio en el procedimiento. Si es así, registre cualquier cambio en cada hoja de datos de muestreo. Estos procedimientos son esenciales para interpretar datos, particularmente cuando el muestreo se realiza en la mina. Es muy difícil evitar la contaminación de las muestras con polvo, muestreo de soluciones de alta concentración y equipo contaminado. A fin de reducir el riesgo de contaminación, debe prestarse especial atención a los procedimientos de manipuleo y limpieza de equipo. No obstante, las muestras de control de calidad se requieren para identificar y cuantificar la contaminación. Si no se preparan muestras para evaluar la contaminación potencial del equipo o reactivos, no existirá una base para evaluar la exactitud de los datos. Esto es de especial importancia si para una muestra se mide un nivel de metal que parece ser anormalmente elevado.

El técnico debe asegurarse de que se mantengan limpios el equipo, los recipientes y el contenedor de almacenamiento de muestras. La contaminación cruzada de muestras también puede reducirse muestreando primero las estaciones de muestra más diluidas (por ejemplo, la más baja concentración esperada). Por ejemplo, las estaciones de muestra de aguas receptoras antes que las estaciones de agua de proceso o drenaje ácido.

Asimismo, el técnico debe recolectar muestras adicionales para verificar la existencia de contaminación en el equipo y en los reactivos. Usualmente, estas muestras se denominan «blancos», lo que significa que no se ha agregado a la botella ninguna muestra de agua durante

la toma en el campo ni después. El propósito es identificar cualquier contaminación presente en el equipo. Los tipos de blancos se describen más abajo, adaptados de Environment Canada (1983). Todas las botellas de QC deben estar rotuladas con un código similar al de las muestras de campo.

**Blanco de botella.** En el laboratorio, antes de salir al campo, seleccione el 10% de cada tipo de botella que se usará en el campo para proporcionar un «blanco de botella». Esta botella deberá llenarse con agua destilada y preservarse al igual que se hace para las muestras de campo, así como almacenarse hasta su entrega junto con las otras muestras para análisis.

Estos resultados indicarán cualquier contaminación que se encuentre presente en las botellas. No deber haber parámetros orgánicos o inorgánicos detectables, con excepción de pH, Eh y oxígeno disuelto, compatibles con el agua destilada.

**Blanco de filtro** Los papeles de filtro son una fuente común de contaminantes si no se almacenan en un contenedor sellado, tanto en el laboratorio como en el campo. Los proveedores de productos de este tipo pueden proporcionar papel de filtro desechable que reduce considerablemente la posibilidad de contaminación.

Antes de emprender cada viaje de muestreo se preparará en el laboratorio un blanco de filtro. El agua destilada se filtra a través del papel de filtro y la muestra se preserva y se analiza como para las de campo. Sin embargo, el aparato de filtro también debe limpiarse para producir una muestra representativa.

**Blanco de equipo** Durante un viaje de muestreo, se usa y lava el equipo para cada estación. No obstante, es posible contaminar muestras mediante soluciones de elevada concentración o lavado incompleto del equipo de muestreo. Se sugiere la preparación del blanco de equipo mediante muestreo y filtrado de agua destilada. Usualmente, es suficiente un blanco por cada diez muestras o un mínimo de 3 blancos de equipo por día, a menos que se detecte contaminación.

**Muestra duplicada** Se hace el duplicado de una muestra al dividirla en dos o más submuestras. Se llena la botella de muestra original y se coloca en dos recipientes más pequeños para análisis. Estas submuestras deben tener números de muestra diferentes. Las muestras duplicadas se toman para cuantificar la variabilidad en los resultados debido al manipuleo, conservación o contaminación de las muestras corrientes.

**Muestra repetida.** Se toma muestras repetidas para conocer la orientación de la variabilidad en la química del agua en una estación teniendo en cuenta tiempo y/o espacio. Estas tienen particular importancia en las primeras etapas de un programa de muestreo, pudiendo realizarse



un estudio piloto para determinar la frecuencia del muestreo repetido.

**Las Muestras repetidas temporales** se toman en el mismo lugar, a intervalos predefinidos por un período de tiempo.

**Las Muestras repetidas espaciales** se toman al mismo tiempo, pero a lo largo de un perfil en el lugar de muestreo. Las repeticiones espaciales pueden tomarse en una sección transversal de un río o corriente o sobre la profundidad de una ubicación única.

Nótese sin embargo que el uso de los términos «duplicado» y «repetido» puede variar entre los distintos laboratorios.

**Muestra modificada por adición** El laboratorio de análisis prepara generalmente estas muestras. Una muestra única se divide en 2 a 4 submuestras, las cuales son modificadas deliberadamente con concentraciones conocidas de un parámetro antes del análisis. Estas muestras no deben ser preparadas en el campo. No obstante, el laboratorio de análisis puede solicitar un volumen considerable de muestra de un lugar para disponer de material suficiente para el análisis de este tipo de muestras (modificadas por adición).

## 4.5 Programa de Campo

### 4.5.1 Observaciones

En el Apéndice 1, se proporciona una hoja de datos de campo para muestras. La primera etapa del programa de campo en cada estación es completar la descripción de la estación, tal como se muestra en el Casillero A de la hoja de datos de campo. Es responsabilidad del equipo de campo tomar la muestra en el mismo lugar en cualquier oportunidad u observar la estación y efectuar recomendaciones para instalar estaciones adicionales o un cambio en el lugar. Esta es la única manera de que los cambios en los datos sobre la calidad del agua se interpreten con fiabilidad.

Deberá mantenerse registros detallados para cada estación, debiendo revisarse éstos antes del viaje de muestreo. Si en la estación se observara algún detalle que sugiriera que puede existir un cambio en la calidad del agua o flujo (por ejemplo, precipitados, coloración, nuevos flujos, daño a las estructuras o construcciones en el área que estén causando una alteración física o cambio en el flujo) será responsabilidad del supervisor y del técnico tomar muestras adicionales, de acuerdo a los mismos procedimientos y, de ser necesario, establecer una nueva estación de muestreo.

## 4.5.2 Toma de Muestras

La topografía, lugar de colección, tipo de muestra y las condiciones del clima determinarán los procedimientos específicos para cada estación. En general:

- en un curso de agua con más de una estación de muestreo, inicie éste en el punto más lejano aguas abajo, particularmente si alguna alteración física en un área pudiera influir en una estación aguas abajo;
- siempre muestree aguas arriba en cualquier camino, cruce o puente, a menos que la influencia de la estructura sea el objetivo del muestreo;
- siempre muestree en el mismo lugar; y
- asegúrese de que la muestra pueda colectarse de manera segura, sin representar un riesgo para el técnico. Si existiera un riesgo bajo ciertas condiciones, la estación de muestreo deberá reubicarse.

Al momento de tomar las muestras:

- ❖ ubíquese de frente aguas arriba mientras muestrea para evitar la contaminación del agua por sedimentos en suspensión;
- ❖ si se tiene que tomar varias botellas de muestra en el mismo lugar, ello deberá hacerse al mismo tiempo. Si fuera posible, es mejor recolectar una gran muestra y dividirla en submuestras;
- ❖ recolecte muestras para someter a QA/QC;
- ❖ enjuague tres veces con agua destilada (sondas para los medidores) o con la solución a muestrear (ya sea la muestra original de la botella de 1L o la muestra filtrada de la botella de metales disueltos) el equipo de muestreo y filtración, equipo de análisis y botellas de muestreo ;
- ❖ manipulee los papeles de filtro únicamente con pinzas limpias. No toque con las manos el interior de las botellas, tapas o equipo de filtración;
- ❖ complete las mediciones de campo en una submuestra y registre estos datos en las hojas de campo (casillero B de la hoja de datos);
- ❖ preserve las muestras tal como se indica en el Cuadro 4.1. Rotule las muestras

y registre los número de éstas y los requerimientos analíticos en la hoja de datos. Almacene las muestras en un enfriador (alejado de la luz solar).

- ❖ registre con cuidado todas las observaciones de campo. Puede ser útil tomar una fotografía del lugar de muestreo, particularmente en las primeras etapas del monitoreo, para fines de comparación con las últimas fases del muestreo y capacitación de otros técnicos.

### 4.5.3 Mediciones de campo

**Flujo** El flujo deberá medirse o calcularse para todas las muestras y en todas las estaciones de muestreo. En el caso de los flujos mayores a través de una zanja o canal, la estación de muestreo deberá estar ubicada en un vertedero o cerca al mismo desde el cual pueda medirse el flujo. En las estaciones de bajo flujo, o en aquéllas sin un vertedero, el flujo puede calcularse:

- ☒ midiendo la profundidad y ancho del canal de flujo para calcular el área transversal, así como el volumen. Cronometrar el regimen de flujo calculando el tiempo de tránsito que requiere un pedazo de escombros flotante para movilizarse en una distancia conocida; o
- ☒ en el caso de un canal pequeño, cronometrando el tiempo requerido para llenar un recipiente de volumen conocido.

El personal de ingeniería deberá verificar las mediciones de flujo con el balance de agua del lugar o sitio.

**Química del Agua** Existe un número de parámetros que deberá medirse in situ o inmediatamente después de la toma de muestra, incluyendo pH, Eh, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto. La muestra para el análisis de campo deberá ser una submuestra de las enviadas para análisis de laboratorio y se deberá desechar después que se efectúe las mediciones. A menudo, no es práctico realizar estas mediciones in situ, tanto por consideraciones de seguridad como debido a que las lecturas pueden ser inestables. Algunos parámetros, tales como Eh o conductividad son inestables en condiciones de flujo turbulento, pero pueden medirse en un submuestra.

El equipo portátil de campo deberá calibrarse en el laboratorio de acuerdo a las directivas o especificaciones del fabricante y la calibración deberá verificarse y ajustarse, de ser necesario, en el campo. Algunos equipos permiten la calibración de acuerdo a la temperatura de la muestra, lo que deberá efectuarse en el campo. Sin embargo, las sondas o electrodos deberán conservarse adecuadamente entre cada viaje de muestreo. Si no se hubieran usado

recientemente, podrán requerir un remojo en una solución buffer durante 15 minutos, antes de que se mantenga una lectura estable. Si una sonda o electrodo de pH se emplea en una solución alcalina, se requerirá un enjuague ácido antes de efectuar mediciones subsiguientes con la finalidad de retirar los precipitados que puedan haber cubierto la sonda. Es prudente efectuar reiteradas mediciones de verificación de estos parámetros de campo. Los procedimientos y cualquier equipo especial de muestreo para medir oxígeno disuelto se proporciona con los medidores.

## 4.5.4 Preservación de la Muestra

Las muestras deberán analizarse a la brevedad posible después de la colección, dado que pueden ocurrir cambios en la química del agua una hora después del muestreo. Sin embargo, en muchas áreas, transportar las muestras del campo a un laboratorio analítico puede demorar varios días. Se ha desarrollado procedimientos para preservar la muestra a condiciones lo más cercanas posible a la condición original.

En el documento U.S. EPA/ACOE (1993), se proporciona un resumen de los procedimientos de colección, preservación y almacenamiento de muestras, en base al cual se ha adaptado la información que figura en la Tabla 4.1. En el caso de las muestras de calidad de agua de mina, existen dos principales técnicas de preservación:

### Adición Química

- ✖ La acidificación, tal como la que se efectúa con ácido nítrico, se emplea comúnmente para preservar las muestras para el análisis de metales.
- ✖ La adición de álcalis, como por ejemplo, hidróxido de sodio, se usa comúnmente para preservar muestras para el análisis de los parámetros estables en pH alcalino, como las especies de cianuro.

### Control de Temperatura

- ☒ La refrigeración de muestras a 4°C es la técnica de preservación más común en el campo junto con la preservación química. La mayoría de muestras deberán almacenarse en un contenedor fresco y oscuro para evitar cualquier cambio en la química del agua.

Esto es muy importante para muestras que no pueden preservarse químicamente sin cambiar la química del agua, tal como aquéllas que se someterán a la prueba de ph, características biológicas de alcalinidad, etc. Los cambios en la

temperatura afectan la solubilidad química y las velocidades de reacción. Si no es posible almacenar y transportar, en forma rutinaria, las muestras en un conservador, se sugiere efectuar una comparación con partes de las muestras; un grupo refrigerado y el otro conservado en condiciones «típicas» para determinar si la diferencia en los parámetros físicos es apreciable. Los cambios en la presión debido a la altitud también puede afectar ciertos parámetros, notablemente la alcalinidad. Si las pruebas de comparación indican un cambio apreciable, la alcalinidad puede medirse in situ, de ser necesario.

- ☒ Algunas muestras podrán someterse a congelación, aunque esto puede ocasionar cambios físico-químicos. Por lo general, esta técnica se emplea más comúnmente para muestreo de sedimentos que para muestras de aguas superficiales.

A menudo, los laboratorios analíticos suministran los equipos de preservación de campo, incluyendo ácidos, guantes y pipetas desechables. Los procedimientos de preservación deberán describirse claramente en las hojas de datos de campo y en las etiquetas de las botellas.

#### 4.5.5. Rotulado

El rotulado claro y consistente de la muestra es esencial para la validez de los datos. Si se determina que una muestra ha sido erróneamente rotulada, se planteará una duda con respecto a la fuente y a la validez de todas las muestras del conjunto.

Podrá obtenerse etiquetas adhesivas de muestras de proveedores especializados o junto con los contenedores de las muestras. Sin embargo, en el caso de muestreo de agua, a veces es aconsejable escribir directamente en la botella con un lápiz a prueba de agua. Las etiquetas adhesivas no deberán colocarse en botellas frías o húmedas ya que pueden despegarse. Puede ser efectivo colocar etiquetas a prueba de agua antes de la toma de muestra. Sólo deberá rotularse la botella, nunca la tapa. Deberá utilizarse un marcador a prueba de agua.

Aunque el personal responsable, en forma conjunta, con el laboratorio analítico determinarán la codificación especial para las etiquetas, la información que se especifica a continuación es común en todas ellas:

- ❖ nombre de la mina
- ❖ fecha de muestreo
- ❖ estación de muestreo y número de muestra
- ❖ preservación
- ❖ código de análisis

La lista de embarque que se incluirá con cada juego de muestras, deberá:

- ❑ consignar todos los números de muestras, así como el análisis requerido para cada una (resumido de la página 2 de la hoja de datos de campo para cada estación);
- ❑ describir los tipos de muestras (aguas superficiales, aguas subterráneas, etc.)
- ❑ consignar las técnicas de preservación empleadas para cada muestra;
- ❑ enumerar la fecha de la muestra, forma y detalle de traslado, el nombre de la compañía, la dirección, el nombre de la persona con la que se efectuará el contacto y el número, así como cualquier requisito especial para el manipuleo, análisis e informes de datos, la garantía de calidad y el control de calidad.

También, puede ser útil para el laboratorio marcar las muestras que se supone tendrán concentraciones particularmente altas o bajas de algún parámetro a comparación de las otras muestras. El supervisor deberá conservar el original de la lista de embarque.

#### **4.5.6 Almacenamiento, manipuleo y embarque**

Las muestras de agua deberán enviarse al laboratorio a la brevedad posible. Durante el almacenamiento y el tránsito, las muestras deberán conservarse en un contenedor fresco, oscuro y en posición vertical. El transportador deberá notificar al laboratorio el envío de las muestras y establecer un programa regular para los embarques. El laboratorio deberá notificar al transportador la recepción de las muestras, de acuerdo con la lista de embarque adjunta.

## 5.0 ASPECTOS ANALITICOS

### 5.1 Selección de Laboratorio

Las instalaciones para analizar muestras de calidad de agua se encuentran disponibles en laboratorios comerciales, laboratorios de universidades y en algunos laboratorios de campamentos mineros. Las prioridades para seleccionar un laboratorio se orientan en el sentido que la instalación:

- cuente con un área separada, limpia y adecuadamente controlada para el análisis de muestras ambientales. El equipo, instrumentos analíticos y espacios o ambientes que se empleen para las muestras de producción de la mina no se utilicen también para las muestras ambientales dado que se puede correr el riesgo de contaminación;
- emplee procedimientos estándar (ASTM, U.S. EPA, o el Manual de Métodos Estándar para Aguas Residuales) o variaciones bien referenciadas y verificadas de los procedimientos estándar;
- conduzca rutinariamente procedimientos de garantía de calidad internos mediante el análisis de Materiales de Referencia Estándar y ponga esta información a disposición de los clientes. Estos son materiales de una concentración conocida de un parámetro específico a ser analizado, certificados por una organización tal como la Oficina de Estándares de Canadá o el Consejo Nacional de Investigación (EE.UU). El análisis de estos materiales proporciona una indicación de la precisión y exactitud del análisis;
- prepare, en forma rutinaria, y analice muestras de garantía de calidad dentro de cada conjunto de muestras de calidad de agua y proporcione estos datos con los resultados correspondientes a otros análisis; y
- pueda proporcionar un servicio rápido y regular.

En la selección de un laboratorio para análisis, resulta muy útil visitar las instalaciones, solicitar información sobre sus procedimientos estándar y revisar cuidadosamente los resultados de garantía de calidad (QA)/control de calidad (QC) de los grupos iniciales de muestras que se envíen al laboratorio para análisis.

## 5.2 Garantía de Calidad(QA)/Control de Calidad (QC) en Laboratorios

La garantía de calidad y el control de calidad (QA/QC) son definidos por la Agencia de Protección Ambiental (EE.UU), respecto a análisis de calidad de agua como: la garantía de calidad (QA) es «...el programa total para garantizar la confiabilidad de los datos de monitoreo». El control de calidad (QC) hace referencia a «... la aplicación rutinaria de los procedimientos para controlar el proceso de medición».

Los resultados de garantía de calidad (QA) y control de calidad (QC) provenientes del laboratorio analítico constituyen el único medio mediante el cual el supervisor de asuntos ambientales puede evaluar la calidad de los datos para cada conjunto de muestras de agua presentadas al laboratorio. Dado que se dedica gran cantidad de tiempo y esfuerzo a colectarlas y que se tomará las decisiones técnicas, económicas y regulatorias a partir de los resultados de estos análisis, el supervisor deberá evaluar la calidad de los datos. También, es conveniente para cualquier laboratorio analítico demostrar que los resultados serán exactos y confiables.

Los programas de garantía de calidad en los laboratorios analíticos incluyen, generalmente, un conjunto de muestras para evaluar, tanto la precisión como la exactitud de los análisis. Estas muestras son similares a aquéllas de garantía de calidad (QA) de campo, pero se preparan en el laboratorio analítico, en forma adicional a las muestras de campo. Las muestras de garantía de calidad (QA) incluyen:

**Blanco de Reactivo** Una muestra de agua destilada se prepara con reactivos y se analiza con un conjunto de muestras de calidad de agua. Este ejemplo proporciona una indicación de cualquier contaminación proveniente de reactivos o procedimientos de laboratorio. El número de blancos de reactivo es por lo general 10% a 20% del número total de muestras.

**Duplicado** Una muestra de agua se subdivide en dos muestras homogéneas para su análisis. Los resultados compararán la precisión del análisis. Por lo general, el 10% de las muestras se prepara rutinariamente como duplicados. Si existe un amplio rango de concentraciones de parámetros en el conjunto de muestras, será prudente efectuar duplicados adicionales.

**Estándares de Verificación** El uso de estándares de verificación es un procedimiento de laboratorio muy común que proporciona una comparación muy útil del funcionamiento de los instrumentos. El procedimiento analítico específico se calibra contra estándares conocidos antes de los análisis de calidad de agua. También, se prepara un conjunto separado de estándares de calibración (conocidos como estándares de verificación) y éstos se intermezclan con las muestras de calidad de agua.

**Modificada por Adición Conocida.** Una cantidad conocida del parámetro que se analiza se



agrega a la muestra. Esto proporciona una indicación de los efectos de interferencia por otros iones y especies en solución sobre la exactitud del análisis. Los ejemplos de adición conocida pueden ser particularmente útiles para analizar parámetros susceptibles a la inferencia, como cianuro o metales en trazas en soluciones de alta fuerza iónica. Por lo general, para un conjunto de muestras de calidad de agua, se efectúa una adición conocida a éstas que oscila entre el 5% y el 10% de ellas.

### 5.3 Certificación y Evaluación del Laboratorio

El requisito de certificación de los laboratorios a cargo de una agencia nacional es una cuestión que está siendo considerada en muchos países. En el Canadá, la certificación no constituye una exigencia legal. Sin embargo, la mayor parte de laboratorios pueden obtener dicha certificación a través de una asociación nacional tal como «Canadian Association of Environmental Analytical Laboratories». En los Estados Unidos, cada Estado determina el requisito de certificación y la agencia certificadora. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos brinda certificación para muchos estados y publica un documento completo sobre garantía de calidad(QA)/control de calidad (QC).

Muchos laboratorios participan en programas de comparación inter-institucionales. Estos constituyen programas útiles y son organizados por un departamento del gobierno o por la asociación nacional de laboratorios ambientales. A menudo, es útil que las compañías mineras envíen periódicamente partes de las muestras (es decir muestras duplicadas, subdivididas de la muestra original) a uno o más laboratorios adicionales para comparación de los resultados.

Cuantificar la precisión y exactitud de los resultados proporcionados por el laboratorio analítico es fundamental para evaluar el conjunto de datos sobre calidad de agua. Al asegurar que se cumple con las prioridades establecidas en la Sección 5.1 e inspeccionar cuidadosamente los resultados de garantía de calidad (QA)/control de calidad (QC) del laboratorio, se podrá esperar una confianza razonable en los resultados. Sin embargo, pueden ocurrir errores en cualquier momento, lo que hace más importante continuar tomando las muestras de garantía de calidad (QA) y control de calidad (QC) en el campo y en el laboratorio.

## 6.0 MANEJO DE DATOS E INFORMES

Los programas de muestreo de calidad de agua generan una gran cantidad de datos. A menos que estos datos se manejen y registren en forma sistemática, siempre permanecerán en cuadernos de apuntes en los laboratorios y no se utilizarán. Los datos sobre la calidad de agua proporcionan información al personal directriz de la mina sobre la eficiencia del procesamiento, el manejo del agua y los sistemas de manejo de desechos. Los datos también pueden utilizarse para evaluar los planes alternativos de disposición de desechos y de manejo de agua. Y, finalmente, estos datos son vitales para determinar la influencia que puede ejercer la mina en la salud del ambiente receptor y de la población local.

### 6.1 Fuentes de Datos

La hoja de datos de campo proporciona las bases para registrar toda la información sobre la calidad de agua. La mayor parte de laboratorios pueden proporcionar los resultados analíticos en forma digital, usualmente en una hoja electrónica de un paquete de software de un computador personal estándar. Los resultados de los parámetros medidos en el campo pueden compararse con aquéllos del laboratorio. Puede revisarse las muestras de garantía de calidad (QA). Igualmente, el personal de la mina puede recolectar información sobre los cambios en el flujo de agua, desarrollo y manejo de agua y desechos. Estos datos también deberán registrarse para cada estación e incluirse en la evaluación de datos, en las estaciones de monitoreo y en los parámetros. Los servicios nacionales pueden proporcionar datos hidrológicos.

Los resultados de análisis de calidad de agua recibidos del laboratorio analítico pueden evaluarse con mayor eficiencia usando algún paquete de hoja electrónica para computadores personales.

### 6.2 Manejo de Datos

Existen cinco etapas principales para la evaluación de datos de calidad de agua

- ❖ Evaluar los datos para detectar errores u omisiones obvios y completar los análisis de verificación que se requiera.
- ❖ Comparar los resultados del laboratorio con los del campo.
- ❖ Ingresar los datos en la hoja electrónica.
- ❖ Comparar los valores con los resultados previos del muestreo. Comparar los valores con los de otras estaciones. Calcular el balance de carga por lugar o por componentes.
- ❖ Preparar el informe.

Este manejo y revisión de datos, por lo general, es responsabilidad del supervisor ambiental.

El análisis específico de los datos de la calidad de agua para cada periodo o estación requiere el uso de los datos de campo y de laboratorio. Existe pocas alternativas a la presentación de estos datos:

- preparar una hoja electrónica para cada estación que se actualice continuamente durante el periodo anual de monitoreo. En este tipo de presentación, el eje vertical sería la lista de parámetros y a lo largo de la fila superior se encontrará la fecha de la muestra a partir del mes de marzo de 1994 correspondiente al primer informe. En cada periodo de informe trimestral, se reemplaza la hoja electrónica anterior con una nueva que muestre los resultados del año a la fecha;
- preparar una hoja electrónica mensual resumiendo los resultados de todas las estaciones para cada mes de modo que, por ejemplo, la columna vertical enumere los parámetros y la fila horizontal consigne la estación. Si las estaciones se muestrean semanalmente o cada dos semanas, deberán subdividirse estas columnas; o
- mantener una hoja electrónica global para acumular la información correspondiente a todo el año hasta la fecha actual. En el caso de cada periodo de muestreo, preparar una hoja electrónica para cada estación y para cada periodo de informe, es decir, reportar únicamente el conjunto de datos más recientes. En seguida, éstos se trasladarán a la hoja electrónica principal para cada estación y lugar, de responsabilidad de la mina y/o de las autoridades regulatorias, en la cual se resume los datos correspondientes al año, hasta la fecha actual.

Una vez que el programa de monitoreo regular se ha establecido, podrá modificarse el formato de informe para cumplir con las exigencias de reglamento. En el caso de cada área de influencia de mina, puede ser más eficaz mantener una base de datos completa, en un formato específico, pero presentar sólo el informe de parámetros o estaciones seleccionados en forma regular. En todos los casos, es usualmente de responsabilidad de la mina o de la compañía minera garantizar que se mantenga un registro completo de datos y que éste se actualice en forma continua.

Para la presentación de los resultados existen algunos puntos claves que deberán seguirse con la finalidad de efectuar una eficiente comparación de los datos:

- los parámetros siempre deberán enumerarse en el mismo eje, es decir, ya sea en forma vertical u horizontal;

# Manejo de Datos e Informes

- ❑ los parámetros se encontrarán siempre en el mismo orden y deberán listarse alfabéticamente;
- ❑ para cualquier lugar o sitio, usualmente es más eficaz emplear la misma lista de parámetros para todas las estaciones (aún cuando no se mida algunos de ellos) lo cual facilita la compilación de las hojas electrónicas;
- ❑ las unidades deberán siempre indicarse;
- ❑ deberá usarse siempre la misma conversión para los valores que «no llegan a detectarse», pero será un valor numérico (por ejemplo, 0, ó 0,5 veces el límite de detección);
- ❑ deberá presentarse siempre las estaciones en el mismo orden —si se elimina alguna estación o si temporalmente no se encuentra en uso, se incluirá hasta el fin del periodo del informe;
- ❑ si se realizan análisis estadísticos, también deberá indicarse el número de puntos de información.

Cada informe deberá contener, como mínimo, la siguiente información:

- ❖ nombre del lugar y número de código (de ser aplicable para presentaciones reglamentarias);
- ❖ nombre de la estación y número de código;
- ❖ periodo y fecha de muestreo;
- ❖ nombre del laboratorio analítico;
- ❖ datos del flujo volumétrico;
- ❖ lista de parámetros (se podrá incluir todos los parámetros clasificados en orden alfabético, o un grupo de parámetros similar al formato que se muestra en la página 2 del apéndice 1; y en el caso de cada grupo, se deberá enumerar los parámetros en orden alfabético);
- ❖ unidades de medida (mg/L,  $\mu$ /L, mg/L CaCO<sub>3</sub>, equivalente, etc.);
- ❖ resultado analítico correspondiente a cada periodo de monitoreo.

También, se incluirán en este informe los resultados de la determinación efectuada por el laboratorio sobre los índices de garantía de calidad (QA) y control de calidad (QC) de la muestra.

## 6.3 Evaluación de Datos

En términos generales, los datos de calidad de agua se podrán resumir de dos formas:

- ☒ **con respecto a la localización** se presentarán los datos para todas las estaciones a intervalos de tiempo específicos con la finalidad de determinar los agentes contaminantes totales del sitio, así como el balance de agua;
- ☒ **con respecto al tiempo** se presentarán los datos para cada estación correspondientes al periodo de tiempo total con la finalidad de evaluar los cambios en el tiempo.

Al incorporar los datos de la calidad de agua en una hoja electrónica, ambos resúmenes pueden prepararse con facilidad. Podrá efectuarse los gráficos requeridos que muestren los cambios en el tiempo y espacio, así como los análisis estadísticos.

Graficar datos analíticos como una función del tiempo o de la ubicación permite la evaluación de una gran cantidad de datos. Graficar los resultados correspondientes a cada estación para el periodo total de interés —por lo general un año. En cada gráfico, se deberá mostrar el flujo y los parámetros claves de interés. Por ejemplo, en el caso del drenaje de una antigua mina subterránea de cobre en la cual se espera un drenaje ácido, se graficará los cambios en los parámetros tales como pH, sulfato, acidez, hierro y cobre en el tiempo. En un embalse de relaves que viene operando, la relación entre el flujo, TDS y los metales totales también deberá evaluarse en el tiempo. Por lo general, éstos deberán ser gráficos de líneas o «XY».

Alternativamente, la carga total para el lugar o sitio en una fecha específica puede mostrarse usando un gráfico de barra o pastel, calculando la carga acumulativa (es decir, el flujo multiplicado por la concentración) a lo largo de una vía de flujo. Por ejemplo, a partir de las estaciones que se muestran en la Figura 2.1, podrá calcularse una carga acumulativa para el río correspondiente a cualquier periodo. En el caso de cada estación, el flujo (en unidades como litros por hora o día) multiplicado por la concentración de cobre (en mg/L) proporciona la carga de cobre, en mg Cu por hora o día. La carga desde las estaciones S4, S12, S16 y S17 deberá ser igual a la diferencia en carga entre las estaciones S1 y S15. Al calcular el balance de carga alrededor del sitio, es posible identificar las principales fuentes de agentes contaminantes. A continuación, a partir de dichos datos puede desarrollarse una estrategia para controlar la incorporación o disolución de agentes contaminantes a las corrientes de agua.

## 7.0 REFERENCIAS SELECCIONADAS

- APHA (American Public Health Association — Asociación de Salud Pública Americana), 1989. Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales. Decimoséptima edición. American Public Health Association, American Waterworks Association y Water Pollution Control Federation.
- Environment Canada, 1983. Muestreo de Calidad de Agua. Sucursal de Calidad de Agua, Dirección General de Aguas Continentales, Ottawa.
- U.S. EPA/ACOE, 1993. *Se proporcionará en breve.*
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency - Agencia de Protección Ambiental. Pautas y Especificaciones para Preparar Planes del Proyecto de Garantía de Calidad. QUAM-005/80 U.S. EPA. Oficina de Monitoreo y Garantía de Calidad. Oficina de Investigación y Desarrollo, Washington D.C.
- U.S. EPA, 1986. Desarrollo de Objetivos de Calidad de Datos. Descripción de las Etapas I y II Preparadas por el Personal de la Gerencia de Garantía de Calidad, U.S., EPA, Oficina de Investigación y Desarrollo, Washington, D.C.
-

**APENDICE 1**

**HOJA DE DATOS DEL CAMPO**

**MUESTREO DE CALIDAD DEL AGUA**

# Apéndice

## Hoja de Datos del Campo Muestreo de la Calidad del Agua

### Lugar de la mina:

Casillero A - Datos de la Estación

Nombre de la Estación:	No. de la Estación:	Establecido en:
Muestreado por:	Ficha:	Tiempo:
Componente:		
Descripción de la estación y observaciones:		

### Casillero B - Datos del campo

Clima	Temperatura				Precipitación		
Flujo	Método				Volumen o profundidad Tiempo y Distancia		
	pH	Eh	Temp.	Cond.	O <sub>2</sub> disuelto	Otros	Muestra de Lab.
Unidades							
Equipo N°							
Calibración 1							
Calibración 2							
Calibración 3							
Muestra N°							
Muestra N°							
Muestra N°							



# Apéndice

## Casillero C - Requisitos Analíticos por:

Verificado

Etiqueta de la muestra			
Estación N°			
Fecha:			
Volumen			
N° de botellas			
Filtración			
Preservación			
Análisis Requerido			
Físico			
Iones - Principales (especifique)			
Metales - disueltos, ICP			
Metales - totales, ICP			
Metales - disueltos, AA (especifique)			
Orgánicos (especifique)			
Petróleo y grasa			
Biológicos (especifique)			
Otros			
Muestras QA			
Número total de botellas			
Laboratorio			
Instrucciones especiales			
Método de embarque	Fecha	Por:	
Confirmación o			
recepción de muestras		Resultados recibidos	

GC-RD  
900131A4 . 14

**Gráfica Industrial "GUCALO" eirl.**

Lic. Elí Carruitero Lozano

☎ 534-4252