

## Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros

### INTRODUCCION

#### 1. Propósito y Alcances

Esta Guía de Manejo de Relaves Mineros proveniente de la Industria Minero-Metalúrgica, ha sido preparada bajo los auspicios del Banco Mundial en asociación con el Programa de Asistencia Técnica al Ministerio de Energía y Minas del Perú. En este contexto, la Asistencia Técnica del Banco Mundial contempla la revisión, modernización y consolidación de asuntos ambientales relacionados a la actividad minera en el país. Dentro de los requerimientos para esto tenemos:

Identificación de las principales prácticas ambientales y su implementación en la actividad minero-metalúrgica con el objeto de mitigar la degradación ambiental generada por la industria. Diseño de un programa general para implementar las prácticas ambientales en la industria minero-metalúrgica en forma sistemática y progresiva.

Se ha determinado que una de las primeras actividades relacionadas con estos objetivos es la preparación de la presente Guía para el Manejo de los Relaves Mineros provenientes de la Industria Minero-Metalúrgica, la que debe dar una visión panorámica del planeamiento, diseño, operación, mantenimiento y cierre de los depósitos de relaves.

Su propósito es que pueda ser usada como un documento de referencia y soporte técnico para ayudar en la preparación de los Estudios de Impacto Ambiental y los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) según lo requiere la regulación para la protección ambiental en las actividades mineras y metalúrgicas (DS No. 016-93-EM) y su modificación (DS No. 059-93-EM). En una perspectiva a largo plazo, esta Guía se propone ayudar a la industria, a los consultores, y al personal del gobierno a comprender el amplio y complejo problema asociado con el manejo de los relaves, enfatizando no sólo las condiciones operacionales sino también aquéllas posteriores a la clausura. Para este fin, la Guía se orienta primariamente hacia lectores que tienen diversas experiencias técnicas con poco contacto con los tópicos tratados. A excepción de unos pocos factores de particular importancia, los detalles pertinentes a la investigación y análisis no son tratados explícitamente pero se hace referencia a ellos en la literatura técnica respectiva.

El objeto de este documento está centrado específicamente en el manejo de los relaves de los procesos de flotación en la extracción metalúrgica de minerales metálicos, aunque muchos de los conceptos discutidos se aplican en principio a relaves no metálicos tales como los desechos finos del carbón. Otras Guías se orientarán complementariamente hacia tópicos que incluyen procedimientos para el monitoreo de aguas, procedimientos para monitoreo de aire, procedimientos para preparación de los PAMA, procedimientos para preparar los Estudios de Impacto Ambiental y Guías para el drenaje ácido, plan de cierre, lixiviación, exploración, manejo del cianuro y otros reactivos químicos, manejo del agua, vegetación y calidad de aire, entre otros. Se intenta a través de esta Guía presentar la tecnología avanzada del manejo de relaves tal como se practica actualmente a nivel mundial y al mismo tiempo mantener un balance con la naturaleza y niveles de tecnología apropiados para el Perú.

En ese sentido la tecnología apropiada es aquella que reconoce factores tales como el geográfico, climático y geológico que son muy peculiares en el Perú, así como los niveles de complejidad consistentes en su infraestructura y la disponibilidad de habilidades técnicas especializadas. Adicionalmente, el costo del manejo de relaves puede tener una influencia significativa en la viabilidad económica de cualquier operación minera, y este factor debe ser considerado en el contexto de una nación en desarrollo con muchas necesidades sociales y económicas. Estos impactos económicos variarán de acuerdo al tamaño y complejidad de cada operación minera individual.

Por estas razones, esta Guía adopta un punto de vista consistente con lo expresado en los requerimientos del programa al que se hizo referencia anteriormente: que las prácticas ambientales en el manejo de relaves deben ser implementadas progresivamente a lo largo del tiempo, con mejoras en tecnología que se desarrollen sistemáticamente hasta niveles más avanzados conforme al desarrollo técnico, socioeconómico y ambiental que el país realice. En esta forma el desarrollo de la tecnología del manejo de relaves y las mejoras ambientales que se logren, continuarán de una manera sostenible.

## 2. Desarrollo Histórico de la Tecnología de Relaves

Una breve revisión de la evolución del manejo de relaves a nivel mundial nos proporciona antecedentes útiles para comprender la tecnología actual. Aunque se sabe que el oro y la plata ya habían sido explotados por los Incas en tiempos Pre-Colombinos, la historia documentada de la minería en el Perú data de la conquista por Pizarro en 1535. A través del Viejo y Nuevo Mundo en ese entonces, el oro era extraído por reducción directa (fundición) de minerales excepcionalmente ricos, pero principalmente por amalgamación con mercurio. La amalgamación de los minerales de oro como son descritos por Agrícola en 1556 (y posteriormente extendida a la plata a fines del siglo XVI) empleaba molinos de mineral impulsados por caballos para moler el mineral en un patio circular o «arrastra», algunas veces en adición a molinos primitivos cuya energía era proporcionada por caídas de agua donde ésta fuera disponible. Desde el punto de vista ambiental, la cantidad de roca chancada y de desmonte fue pequeña y se hicieron esfuerzos para recuperar y conservar el mercurio, el cual era casi tanpreciado como el mismo mineral. Sin embargo, grandes cantidades de mercurio permanecen distribuidas alrededor de la ubicación de las viejas minas de plata en el Perú y constituyen un serio riesgo ambiental aún hoy día.

Las primeras actividades mineras ocasionaron también problemas de calidad de agua. En lo que es posiblemente una de las primeras referencias al drenaje ácido, Agrícola (en 1556) observó:

«El argumento más fuerte de los detractores de la minería es que los campos son devastados por las operaciones mineras... Además, cuando los minerales son lavados, el agua que ha sido utilizada envenena las corrientes de agua y destruye los peces o los ahuyenta... Así como se ha dicho, es claro para todos que hay un gran detrimento de la minería que supera el valor de los metales producidos por la mina».

Las prácticas de chancado similares fueron adoptadas para los minerales básicos y esto parece haber cambiado muy poco hasta mediados de 1800 cuando la introducción del vapor incrementó notablemente la capacidad de los molinos de caída libre (stamp mill) y por lo tanto la producción de desechos. Después de la separación de las partículas de mineral chancado, de acuerdo a diferencias en su gravedad específica, las partículas remanentes o «colas» también «relaves», fueron acumuladas en una ubicación conveniente, usualmente sobre el curso más cercano de agua, a fin de que fueran arrastradas por él.

Dos desarrollos significativos ocurrieron en los años 1890: el desarrollo de la «flotación» y la introducción del cianuro para la extracción de oro.

La flotación permitió la producción de cantidades aún mayores de relaves con contenido de arena muy fina y partículas sumamente pequeñas (lamas). Sin embargo, las prácticas de disposición previas permanecieron por mucho tiempo sin sufrir cambios, ocasionando que los relaves fueran depositados sobre mayores distancias de arroyos y lagos.

Al mismo tiempo, distritos mineros remotos empezaron a florecer en muchas partes del mundo, atrayendo el desarrollo agrícola como complemento. Esto alimentó conflictos sobre el uso del agua y su disponibilidad ya que los relaves acumulados empezaron a obstruir los canales de irrigación y a contaminar las tierras de cultivo aguas abajo. Estos asuntos fueron litigados en muchos distritos mineros de Norteamérica y Europa entre 1900 - 1930, lo cual en forma gradual determinó el cese de la descarga descontrolada de relaves y dio paso a la construcción de algunas de las primeras presas para almacenar relaves. Muchas de estas presas originales

## INTRODUCCION

servieron tanto para la captura de relaves en corrientes de agua como para almacenar agua para los procesos de flotación durante los períodos de sequía. Sin embargo, ellos fueron a menudo, construidos a través del cauce de los arroyos, con precauciones limitadas para soportar inundaciones, por lo cual muy pocas presas sobrevivieron por largo tiempo.

Sin el moderno equipo mecanizado de movimiento de tierra, era imposible la construcción de presas de tierra convencionales para almacenar relaves de cualquier operación minera de esta era. Como resultado, los mineros desarrollaron un procedimiento de construcción manual, conocido actualmente como el método «aguas arriba», donde un depósito con dique bajo era inicialmente llenado con relaves depositados hidráulicamente luego elevado paulatinamente mediante la construcción de bermas bajas encima y detrás del dique del nivel anterior.

Este procedimiento manual de construcción permanece en uso en muchas minas del Perú aún hoy día. A nivel mundial, el abandono de este método se produjo a raíz de la falla sísmica de la presa de relaves Barahona en Chile en 1928, la misma que fue reemplazada utilizando el método más estable de «aguas abajo» y que fue posible mediante el uso de «ciclones» para separar del flujo la fracción de tamaño grueso (arenas) para la construcción de la presa. Alrededor de 1940 la disponibilidad de equipo de movimiento de tierras de gran capacidad, especialmente en las minas de tajo abierto, hizo posible la construcción de presas de relaves de tierra, compactadas en una forma similar a la construcción convencional de represas de agua y con el correspondiente grado de seguridad.

El desarrollo de esta tecnología inicial de presas de relaves procedió sobre una base puramente empírica mayormente relacionada con las prácticas de construcción y equipo disponible en esa época y sin el beneficio del diseño de ingeniería en el sentido contemporáneo. Aun así, alrededor de 1950 muchos principios fundamentales de ingeniería de presas fueron comprendidos y aplicados a las presas de relaves en muchas minas de Norteamérica. No fue sino hasta los años 1960, sin embargo, que la ingeniería geotécnica y las disciplinas relacionadas adoptaron, refinaron, y aplicaron ampliamente estas reglas empíricas de diseño. Las fallas sísmicas de un número de presas de relaves en Chile (1965), recibieron mucha atención y demostraron ser un factor clave en las primeras investigaciones del fenómeno de la licuefacción sísmica, una particularidad de la conducta de las presas de relaves que continúa siendo de particular significación en estos días. Los asuntos relacionados a la contaminación del agua subterránea y las medidas para reducirla fueron consideradas seriamente en 1970 en relación con los relaves de uranio y estos asuntos crecieron en importancia a través de la década de los 80, conforme la atención empezó a variar de la estabilidad física de los depósitos de relaves hacia los efectos químicos y al transporte de los contaminantes.

Actualmente muchos problemas ambientales asociados con el manejo de los relaves en Norteamérica y Europa están relacionados con la contaminación potencial del agua superficial y subterránea. Las nuevas tecnologías de tratamiento para la destrucción del cianuro se practican universalmente en operaciones de oro que descargan el agua de la planta a los arroyos receptores. Han habido importantes avances en el desarrollo de recubrimientos de materiales sintéticos que buscan reducir la infiltración, aunque la transferencia de la tecnología de recubrimientos para rellenos de tierra y para los desechos peligrosos aún no satisface la totalidad de las características especiales que demandan los depósitos de relaves.

Sin embargo un cambio casi revolucionario se ha producido alrededor de 1990, con el creciente reconocimiento de que los depósitos de relaves, aún aquéllos físicamente estables, no pueden ser abandonados sin considerar sus efectos de largo plazo sobre el ambiente, la salud y la seguridad. Uno de tales efectos de relaves adyacentes a áreas habitadas puede ser la ingestión directa por los niños, de partículas llevadas por

el viento, tales como el plomo. Un problema más severo conocido genéricamente como «drenaje ácido de roca» o ARD (Acid Rock Drainage), es la generación de ácido y metales acompañantes en solución debido a la oxidación de los minerales sulfurados que pueden estar contenidos en los relaves, desmontes de roca, y las superficies expuestas a la mina. Con características específicas para cada cuerpo mineralizado y difícil de generalizar, la compleja físico-química y bioquímica del proceso ha sido reconocida recientemente, pero los métodos experimentales para diagnosticar el problema aún no han podido ser totalmente comprobados en la práctica.

La investigación sobre métodos para mitigar el ARD en los depósitos de relaves es continua, pero no hay método singular aplicable y apropiado para todas las condiciones.

La tecnología para la mitigación del ARD está aún en su infancia y las soluciones se desarrollan para cada caso específico. Aún así, ahora se reconoce que la consideración de estos asuntos no puede postergarse hasta la clausura y abandono del depósito, pues las medidas de mitigación entonces necesarias pueden ser incompatibles con las condiciones que existan. En cambio y de acuerdo a la filosofía que ahora se conoce como «Diseño para el Cierre», estas medidas deben ser integradas desde las primeras etapas del planeamiento de relaves, con planes específicos y detallados, que cubren la estabilidad física y química desde el inicio de la descarga de relaves durante toda la vida operativa de la mina y hasta mucho más allá del cierre de la mina.

En general, este documento es consecuente con la historia de la tecnología del manejo de relaves y muchas de las lecciones aprendidas de experiencias del pasado forman las bases de la práctica internacional actual. Este desarrollo histórico debe ser especialmente útil al lector para interpretar las prácticas actuales en el Perú dentro del contexto de una tecnología internacional más amplia para el manejo de los relaves.

### 3. Prácticas Actuales y Futuras de Manejo de Relaves en el Perú

Actualmente el Perú tiene 176 minas metálicas en operación con un número desconocido de depósitos de relaves activos e inactivos. De estas minas, 54 producen más de 100 tons/día y sólo 26 más de 500 tons/día. Siete de éstas son operaciones a tajo abierto con minas subterráneas completando la diferencia. Este inventario de pequeñas minas subterráneas primarias contrasta con las grandes operaciones a tajo abierto que prevalecen en Norteamérica e influencia el nivel de la tecnología de manejo de relaves que se practica actualmente en el Perú.

Aunque hay excepciones, en el Perú predomina el tipo de tecnología de disposición de relaves anterior a 1940 descrita en la sección anterior.

Por ejemplo, la descarga descontrolada de grandes cantidades de relaves (hasta 4,000 tons/día) directamente a los ríos es practicada en algunas operaciones, mientras que la descarga también descontrolada a lagos o playas del mar también es frecuente. Sin embargo, en la mayoría de las minas se han construido presas de relaves en un intento de mantener a éstos fuera de los arroyos y ríos; dichas presas han tenido un éxito relativo. Esta práctica, presenta por sí sola un tremendo desafío para muchas minas en los Andes, con extremos topográficos rara vez encontrados fuera de los Himalayas. Debido a la disponibilidad muy limitada de equipo de movimiento de tierra de gran capacidad en la mayoría de las minas subterráneas pequeñas, los métodos de construcción de presas para relaves están limitados, principalmente, a la descarga directa por grifos, cicloneo y labor manual. Las prácticas de diseño de las presas para relaves son casi enteramente empíricas y típicas de aquellas utilizadas en la industria minera con anterioridad a la amplia transferencia del conocimiento geotécnico e hidrológico aportado por la tecnología de diseño de presas de agua.

Desde un punto de vista de ingeniería, la mayor deficiencia del diseño de estas presas para relaves es que no toman en cuenta eventos extremos (inundaciones y terremotos), ni durante el proceso de diseño de la presa ni durante el establecimiento del depósito. Así, el tipo de presas de relaves sísmicamente vulnerables, «aguas arriba», predomina en el Perú; el sistema

de derivación del agua superficial tiene capacidad para un poco más que el flujo normal y los depósitos de relaves están colocados en cañones muy empinados donde los devastadores huaycos limitan su existencia a unos pocos años. Las prácticas actuales de las presas de relaves tienden a considerar casos extremos que tienen intervalos de recurrencia de quizás algunas pocas decenas de años, con la percepción en algunas minas de que la protección contra inundaciones no es necesaria en climas secos y que los terremotos son demasiado esporádicos como para prestarles mucha atención. La práctica internacional sobre seguridad en presas de relaves que requieren un diseño para casos extremos, y consideran intervalos de ocurrencia

de muchos cientos o miles de años (para no mencionar los conceptos de la «precipitación máxima probable» o el «terremoto máximo creíble») son ampliamente desconocidos. Esto ha dado como resultado que la ocurrencia de fallas sísmicas e hidrológicas ocasione la ruptura de diversas presas de relaves en el Perú, determinando numerosas pérdidas de vida.

Al mismo tiempo, sin embargo, varias minas en el Perú utilizan actualmente prácticas novedosas de disposición de relaves, tal como el relleno subterráneo, método de descarga espesada y disposición de relaves deshidratados. Estas operaciones demuestran claramente que alternativas a los depósitos de relaves convencionales pueden ser prácticas y posibles en el Perú.

Por lo tanto, es importante interpretar los objetivos de la protección ambiental en el contexto de estas realidades. Al nivel actual de la tecnología de manejo de relaves en el Perú, la protección ambiental es de principal interés para la salud humana y la seguridad. Esto se refleja de inmediato en la necesidad de adoptar prácticas y procedimientos de ingeniería para brindar protección contra la pérdida de vidas ocasionadas por las fallas de las presas de relaves junto con la necesidad de mantener los relaves y el agua de proceso fuera de los riachuelos y ríos no sólo durante la operación de la mina sino por un período indefinido de tiempo posterior a su cierre.

El desarrollo cronológico de las prácticas de relaves descritas en el punto 2 también proporciona una referencia útil para evaluar las prácticas actuales sobre calidad de agua en el Perú. Con excepción de las regiones desérticas del sur del país, en muy pocos depósitos de relaves se recircula el agua de proceso hacia la concentradora. En lugar de ello, el agua de proceso se descarga directamente desde el depósito a los arroyos y ríos, utilizando agua fresca para satisfacer las necesidades de la concentradora. A causa de las restricciones topográficas, el tamaño reducido de muchos depósitos de relaves limita el tiempo de retención para la sedimentación de las partículas finas del relave, ocasionando así dificultades para controlar los sólidos suspendidos en las aguas de proceso que vierten muchas minas pequeñas. La preocupación por la protección del agua subterránea que se inició en Norteamérica en la década de los 80, no ha repercutido aún en el Perú, debido probablemente a que casi todas las fuentes de agua en el país se desarrollan actualmente a partir de aguas superficiales o acuíferos directamente conectadas a las aguas de superficie. La preocupación por la calidad de las aguas superficiales está directamente relacionada con la salud humana y con la irrigación. En este contexto, la calidad del agua superficial relacionada con la minería en el Perú no se diferencia mucho de aquellas existentes en otros lugares en los días en que los relaves eran descargados directamente a los ríos y corrientes de agua.

Por ejemplo, por lo menos 8 ríos principales en el Perú están afectados por altos niveles de cianuro y/o metales, incluyendo cobre, plomo, zinc, cadmio, arsénico, níquel, y mercurio (DGAS, 1992). Al mismo tiempo, sin embargo, algunos de estos ríos son también afectados por contaminantes que no están relacionados a la minería, tales como los coliformes y nitratos, incluyendo el Rímac que es la única fuente de agua de beber para 8 millones de habitantes en Lima.

Internacionalmente, los estándares restrictivos para la calidad del agua superficial son aún más severos que aquéllos para el agua de bebida y son derivados frecuentemente de la baja tolerancia a los metales por parte de la vida acuática sensitiva, tal como los peces salmónidos. Desde un punto de vista práctico, tales estándares no parecen ser muy apropiados en el corto

plazo para el Perú, donde aún el tratamiento primario de aguas servidas, municipales y domésticas está apenas difundándose.

De esta discusión se desprende que las actuales prácticas de minería, manejo de relaves y protección ambiental en el Perú tienen aún que desarrollarse hasta alcanzar los niveles de otras latitudes. Sin embargo, se puede esperar que esta situación cambie rápidamente conforme la inversión internacional en minería llegue al país. Por ejemplo, la eficiencia en el minado favorece a menudo las operaciones de tajo abierto de grandes inversiones, que produce más relaves de minerales de baja ley, y estas prácticas podrían repercutir en cambios significativos de las prácticas actuales empleadas para el manejo de relaves de las minas subterráneas. También conjuntamente con la inversión extranjera, tendremos la tendencia a que lleguen a este país las prácticas ambientales y de manejo de relaves establecidas en otros países.

Por estas razones, esta Guía centra su atención en la actual tecnología internacional para el manejo de relaves. Se espera que la diferencia entre esta tecnología y las prácticas actuales en el Perú disminuyan rápidamente conforme las nuevas minas acentúen su influencia en la producción de minerales en el país.

Para las minas existentes, acceder a tecnología más avanzada puede ser muy difícil porque las instalaciones están ya establecidas en un lugar y mucho del daño ambiental ya ha sido hecho. Para las minas existentes el problema no es «cuánto sería deseable» sino «qué cosa es posible hacer». A pesar de que la tecnología en este documento se aplica a las minas existentes de manera muy general, las medidas correctivas requeridas y las investigaciones pertinentes no pueden generalizarse de una mina a otra y es necesario realizar, en cada caso, estudios específicos.

Aunque se centra primariamente en las nuevas minas en el Perú, es muy importante hacer dos advertencias. La primera es que aún la más avanzada tecnología internacional no puede necesariamente ser aplicada directamente y casi siempre se requerirá hacer cambios y adaptaciones a las condiciones específicas del país. La segunda se refiere a que las condiciones en el Perú son más variadas que cualquier otro país del mundo, y cada generalización de esta Guía tendrá excepciones para operaciones específicas y lugares específicos.

Con estas calificaciones la siguiente sección muestra los principios fundamentales que deben guiar el futuro del manejo de los relaves en el Perú.

#### 4. Objetivos del Manejo de Relaves

Ningún programa sistemático para el manejo de relaves llegará lejos a menos que sus objetivos sean claramente expresados. Para este fin, primero es necesario definir la secuencia de las fases de tiempo que se aplicarán durante la vida de la instalación:

**Construcción.** El desarrollo de un depósito de relave implica por lo general, una importante etapa de construcción. Aunque estas actividades pueden continuar durante la vida de la instalación, la fase de «construcción» se refiere aquí a las actividades iniciales anteriores al arranque de la concentradora. Los impactos ambientales durante este tiempo pueden incluir calidad del aire (polvo) y calidad del agua (derrames de sedimentos), pero éstos son de una naturaleza común a todos los demás aspectos del desarrollo inicial de una mina. Ellos pueden ser tratados mediante medidas de rutina y no serán consideradas en este documento.

**Operación.** El período de operación comienza y termina con la descarga de los relaves en las instalaciones. Esta duración es usualmente determinada por la vida de la mina, que a su vez es gobernada por factores económicos, precios de los metales, y reservas geológicas. Los períodos típicos de operación de un depósito van de 10 a 20 años, aunque algunos están aún operando después de 90 años. El planeamiento operacional para relaves debe considerar como volumen mínimo, la cantidad total de relaves obtenibles con las reservas económicamente minables al momento de la iniciación del proyecto. Es deseable, en lo posible,

incorporar una provisión para contingencias causadas por extensión de las reservas de mineral.

**Cierre.** El período de cierre comienza al término de las operaciones de la concentradora y de la descarga de relaves. Durante este tiempo se construyen las instalaciones adicionales que puedan ser requeridas para alcanzar la estabilidad física o química a largo plazo (por ejemplo, zanjas y conductos permanentes de derivación del agua); y se inicia la rehabilitación (por ejemplo, colocando tierra de cultivo y sembrando). El período de cierre requiere el monitoreo de estos parámetros adicionales por el período de tiempo necesario para asegurar su adecuado funcionamiento y para realizar cualquier modificación necesaria. En el caso que se proporcionen fianzas, garantías, bonos u otros documentos financieros para garantizar el cumplimiento exitoso de las medidas de cierre; entonces el fin del periodo de cierre coincidirá con la devolución de los bonos fianzas, etc. de la compañía minera. En general, el tiempo de cierre puede tomar de 2 a 30 años, aunque es típico el lapso de 5 a 10 años y depende de la complejidad y requerimientos técnicos de las medidas de cierre y el monitoreo pertinente. Las medidas de cierre deberán ser tales que su implementación sea también factible en la eventualidad del cese prematuro de las operaciones, debiendo incluirse también, en el planeamiento de cierre, las condiciones de contingencia para la suspensión temporal de las operaciones.

**Post-cierre.** El post-cierre o abandono comienza a continuación de la exitosa terminación de las medidas de cierre y se extiende tanto como se requiera para que la estabilidad física y química del depósito de relaves quede asegurada. Para propósitos prácticos, esto generalmente significa indefinidamente y para circunstancias que involucran ARD ello puede alcanzar períodos de hasta 1000 años. Una implicancia importante es que las consideraciones de diseño para casos extremos tales como inundaciones y terremotos, deben ser capaces de acomodar los eventos más grandes que puedan ocurrir, potencialmente mucho más grandes que aquellos requeridos para el diseño durante el período de operación.

Con estas etapas en la mente, los objetivos del manejo de relaves pueden ser establecidos simplemente de la siguiente manera:

- La estabilidad física de los depósitos de relaves debe estar asegurada durante la operación, cierre y a lo largo del período de post-cierre. La seguridad de las poblaciones afectadas, contra los efectos físicos de una falla en el depósito, debe ser considerados siempre en primer lugar. Aunque ciertas medidas de mitigación ambiental pueden entrar a menudo en conflicto con requerimientos de estabilidad física, este objetivo no puede ser comprometido. No hay mitigación ambiental posible por mucho tiempo, a menos que los depósitos permanezcan estables.
- La migración de contaminantes a través del aire, agua superficial o subterránea debe ser minimizada. Durante el período de operación podrían requerirse medidas estructurales (por ejemplo recubrimientos para reducir la infiltración) a fin de cumplir con este objetivo, dependiendo de los Límites Máximos Permisibles de Emisión establecidos por el Ministerio de Energía y Minas. En otras circunstancias operacionales, pero especialmente durante el período post-cierre (debido al inevitable deterioro de materiales manufacturados), podría autorizarse la consideración de los procesos naturales de mitigación de contaminantes conjuntamente con la capacidad de asimilación del ambiente natural. En términos generales, las medidas pasivas que se basan en características intrínsecas de los materiales y procesos naturales deben ser preferidas sobre los sistemas activos e instalaciones que requieren operación y mantenimiento apropiados para que funcione según lo proyectado.
- No es recomendable considerar el monitoreo o mantenimiento a largo plazo para satisfacer los dos objetivos anteriores durante el período de post-cierre. Por último, alguna institución gubernamental debe ser responsable de conducir y controlar tales requerimientos y no es razonable o práctico por ahora, esperar que el Ministerio de Energía y Minas u otro cuerpo gubernamental en el Perú acepte tal responsabilidad, aún si los fondos son proporcionados por la compañía minera. Esto significa que los depósitos de relaves deben alcanzar un

status de «salida» («walk-away») a través del período de post-cierre, sin la necesidad anticipada o pronosticada de mantenimiento, reparación o intervención.

Los objetivos para el manejo de relaves son metas deseables que pueden ser imposibles de satisfacer íntegramente en cualquier circunstancia dada. Sin embargo, ellas forman un conjunto de criterios consistentes por medio del cual las alternativas, métodos y planes específicos pueden ser evaluados.

Varias observaciones importantes surgen directamente de estos objetivos. Primero, la descarga directa de relaves a riachuelos y ríos no puede alcanzar los objetivos de estabilidad física o minimización de la migración de contaminantes. La deposición y transporte de relaves y los contaminantes correspondientes continuará ocurriendo indefinidamente, por la acción de procesos fluviales naturales que no pueden ser pronosticados o controlados confiablemente. Segundo, la recirculación del agua de proceso de la concentradora debe ser maximizada a fin de lograr el objetivo de minimizar la contaminación. Es casi siempre posible, y económicamente aceptable, capturar y recircular la mayor parte del agua de proceso de la concentradora, excepto en climas húmedos en donde la precipitación es tan alta que la descarga directa de las escorrentías acumuladas no pueda ser evitada.

Finalmente, no habrá introducción completa al tópico del manejo de relaves en el Perú si no se indica que la dificultad en alcanzar los objetivos para el manejo de relaves, requiere un esfuerzo coordinado entre la gerencia de la mina y el personal de operaciones. El mensaje fundamental que esta Guía puede dar es que el manejo de relaves debe ser considerado tan importante como la recuperación del metal. Del mismo modo que, ningún proyecto minero serio puede ser planificado u operado sin un esfuerzo enorme de parte de geólogos, ingenieros de minas, ingenieros metalúrgicos, analistas financieros altamente entrenados y experimentados, tampoco es posible un adecuado manejo de los relaves sin la contribución de técnicos especialistas en los campos del procesamiento de minerales, tratamiento de agua, geoquímica, construcción civil, sismología, hidrología, agronomía, y biología, así como ingenieros en geotécnica, hidráulica e ingeniería de minas. Es esencial que todas las fases del manejo de relaves sean conducidos bajo la directa supervisión de especialistas, no únicamente bien entrenados y competentes en estos campos, sino que también cuenten con experiencia práctica en el tema de relaves.

## CARACTERISTICAS

### Capítulo I. CARACTERISTICAS DE LOS RELAVES

#### 1. Tipos de Residuos Mineros

Hay diferentes y variados procesos para la extracción de mineral, comunmente empleados en la industria minera. Pero esta Guía trata solamente con los residuos sólidos y líquidos generados por la concentración y cianuración. La concentración no es practicada en cada mina y el lector debe tener en cuenta que relaves, tal como se define más adelante y son considerados en esta Guía, estarán asociados únicamente con aquellas minas que la efectúan. Además, esta Guía está específicamente orientada a los relaves derivados de la extracción de metales preciosos (oro, plata) y metales básicos (cobre y plomo/zinc o Cu y Pb/Zn), ya que estos minerales son los que dominan la industria minera peruana en el futuro previsible. Los minerales polimetálicos son aquellos a partir de los cuales se extrae una amplia variedad de metales y son usualmente altos en minerales sulfurados, tal como la pirita. Otros relaves tales como aquellos derivados del hierro y del lavado del carbón no se discuten aquí, pero muchos de los mismos principios son aplicables.

#### a) Origen y Producción de Relaves de Concentradoras

El proceso de concentración comienza con el chancado del mineral proveniente de la mina hasta tamaños de partículas generalmente en el rango de centímetros o milímetros. El mineral chancado es luego reducido a tamaños menores a un milímetro, en grandes tambores rotatorios clasificados como molinos de bolas, molinos de varillas y molinos semi-autógenos (SAG). Se agrega agua al mineral molido y el material permanece en forma de lodo (pulpa) a través del resto del proceso de extracción.

El siguiente paso es llamado comúnmente flotación. La flotación opera sobre el principio de que partículas individuales que contienen el mineral que se desea extraer son hechas receptivas selectivamente, a pequeñas burbujas de aire que se adhieren a estas partículas y las elevan a la superficie de un tanque agitado. Las espumas que contienen estas partículas valiosas son retiradas de la superficie, procesadas, y secadas para transformarse en concentrado, este producto final de la concentradora, es embarcado a la fundición para su refinación. Entre tanto, las partículas de desecho que quedan constituyen los relaves. Después de recuperar algo del agua del proceso en tanques apropiados, conocidos como espesadores, los relaves son bombeados al lugar destinado para su almacenamiento. Para el hierro (magnetita) la concentración precede a la flotación, la que entonces extrae los sulfuros de hierro del concentrado de magnetita y los descarga como relaves.

Una variación de este proceso es mucho más comúnmente utilizado para los minerales de oro y plata. Los procesos de chancado y molienda se realizan en forma similar excepto que usualmente cuando se realizan hasta un tamaño más fino a fin de mejorar la recuperación de granos microscópicos de mineral. Para incrementar el pH hasta alrededor de 11 se agrega cal y la posterior adición de cianuro disuelve el oro y la plata.

En el proceso convencional de cianuración, la solución de cianuro que contiene los metales disueltos es separada de los relaves a través de una decantación en contra-corriente (CCD). La solución final es diluida reduciendo las concentraciones de cianuro y descargada con los sólidos de los relaves. Los procesos similares, carbón en pulpa (CIP) y carbón en lixiviación (CIL) añaden carbón al mineral molido como una forma de recuperar el oro y la plata de la solución cianurada. Mientras que los relaves sólidos CIP y CIL son los mismos, las concentraciones de cianuro en el líquido efluente que acompaña a los relaves son más altas que los obtenidos con CCD.

Para propósitos de esta Guía, la comprensión de los detalles de las técnicas del proceso no es esencial pero será muy útil para anticipar las características físicas y químicas de los relaves producidos por una concentradora particular. Estas técnicas generales de procesamiento proporcionan las bases para definir los relaves que se consideran aquí.

Relaves:

Se definen como el deshecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo.

Note que esta definición excluye otras formas de desechos mineros producidos en forma sólida. Estos no son cubiertos en esta Guía pero varios tipos de ellos se mencionan brevemente más abajo, principalmente para distinguirlos de los relaves tal como se han definido aquí.

#### b) Otros Residuos Sólidos

Desmante de mina: es roca extraída durante el minado para tener acceso al mineral. En las minas subterráneas, este material es usualmente de tamaño menor que 20 cms. y las cantidades llevadas a la superficie son comparativamente pequeñas. El desmante de las minas a tajo abierto es mucho más grueso, su rango de tamaño va desde un metro hasta polvo y las cantidades producidas pueden ser bastante grandes, llegando a menudo hasta dos a cuatro veces la de los relaves. Aunque las prácticas de manejo para este tipo de material está fuera de los límites de esta Guía, se puede decir que la estabilidad de los echaderos de la mina son rara vez un problema excepto en ciertos casos que involucran climas húmedos o cuando se introducen fluidos; cuando el echadero contiene arcillas o material inusualmente fino, o cuando

existen suelos arcillosos en los cimientos del echadero (Zovodni, et. al., 1984; Dawson, et. al., 1992; Broughton, 1992; Proceedings, 1986). El desmonte de minas es importante en el contexto del manejo de relaves porque puede proporcionar material de buena calidad para la construcción del dique de una presa superficial. Los desmontes de mina pueden ser, sin embargo, una fuente potencial de drenaje ácido y comparte con los relaves mucho de la tecnología relacionada con ARD.

Residuos o Desmontes de Pilas de Lixiviación, son aquéllos que se derivan de un tipo de extracción mineral que consiste en que al mineral, chancado o no, se le añade soluciones de cianuro para oro o ácido sulfúrico para cobre por medio de una irrigación superficial o por infiltración. Un proceso relativo al cobre, «dump leaching», involucra añadir solución de ácido sulfúrico a botaderos de desmonte. Estos procesos tienen características especiales y tecnología que no se discuten aquí.

Escorias, resultan del enfriamiento de residuos fundidos derivados de la fundición de concentrados de metales básicos. Las escorias de fundición pueden contener metales tales como arsénico, cadmio, y plomo en concentraciones potencialmente tóxicas.

Los Relaves de Placeres o Lavaderos, son producidos por operaciones de dragados de oro y menos comúnmente en el dragado de minerales de estaño. Este material es usualmente del tamaño de grava gruesa o mayor y está desprovisto de nutrientes o material capaz de formar suelos. Los asuntos ambientales involucran problemas de sedimentación y revegetación en los arroyos los cuales son específicos para estos materiales. El contenido de mercurio de los residuos tanto de grandes dragas como operaciones en pequeña escala en la selva peruana son motivo de gran preocupación.

Relaves de Jig, son producidos por la separación gravimétrica, casi siempre en combinación con la molienda en las operaciones auríferas comunes. Tienen un tamaño mayor que los relaves de flotación pero en todo lo demás son similares. La amalgamación con mercurio es aún usada ampliamente para procesar concentrados gravimétricos de oro en pequeñas operaciones del Perú.

Relaves de Cianuración con Aglomeración y Peletización, son producidos por el retratamiento de relaves de amalgamación ricos en oro, mayormente en operaciones muy pequeñas a lo largo de la costa. Los relaves consisten en pelets que van de uno a dos centímetros en tamaño y que son descargados en estado semi seco.

## 2. Propiedades Físicas y Estructurales

Las características físicas de los depósitos de relaves dependen fundamentalmente de la forma hidráulica de su deposición. Estas propiedades son importantes para comprender cómo responderá el depósito a la carga, a la infiltración y al movimiento sísmico.

### a) Características de la Deposición

Los relaves son casi siempre transportados desde la concentradora a través de una tubería, en la forma de pulpa (mezcla de agua y sólidos), en concentraciones que van de 20 a 50% de sólidos en peso. En los depósitos superficiales la pulpa es descargada desde la cresta del dique, sea a través de grifos en la línea de relaves espaciados más o menos de 10 a 50 mts. (Figura 1.1(a)) o por una reubicación periódica del extremo de la tubería de descarga (Figura 1.1(b)). Conforme los sólidos se asientan a partir de la pulpa descargada, se forma una playa de leve inclinación que se extiende desde el punto de descarga hasta la poza de decantación donde el agua remanente de la pulpa se acumula para ser recirculada a la concentradora.

En teoría, el material más grueso se asienta inicialmente a partir de la pulpa, las partículas más finas se asientan más lejos de la playa, y las mucho más finas, del tamaño de arcillas y limos,

se asientan en la poza de decantación dando lugar al modelo altamente idealizado de segregación por tamaño y permeabilidad relativa mostrada en la Figura 1.1(c). Esto crea zonas de relaves dentro del depósito que están segregadas por el tamaño del grano y que son conocidas por la siguiente terminología:

Arenas, arenas de relaves, o relaves arenosos, son materiales predominantemente más grandes que 0.074 mm lo que significa que menos del 50% son más finos que ese tamaño.

Lamas, son predominantemente materiales del tamaño del limo, más del 50% menor de 0.074 mm.

Aunque el modelo conceptual de la Figura 1.1(c) se aplica usualmente en el sentido más general, la realidad presenta a menudo una figura mucho más compleja. El grado actual de segregación por tamaño de partícula varía notablemente tanto dentro de un depósito dado como de un depósito a otro, de acuerdo a factores tales como la fineza de molienda, el contenido de sólidos, el caudal y pH de la pulpa descargada. Estos mismos factores influyen en el talud y la densidad in-situ de los relaves y han sido materia de estudio por varios investigadores (Coinlin, 1989; Kupper y Asociados en 1922a, b; Abadjiev, 1985; Bolt, 1988; Fourie, 1988). En la mayoría de los depósitos en operación el tamaño y ubicación de las pozas de decantación varía, y el método de descarga por grifos y la ubicación de la descarga cambia, de tal manera que la arena y las zonas intermedias que se muestran en la Figura 1.1(c) pueden resultar escasamente diferenciadas con depósitos notablemente heterogéneos conformados por estratos horizontales de arena y lamas.

## CARACTERÍSTICAS

Hay tres excepciones principales donde pueden ocurrir condiciones más uniformes. La primera es, si el contenido de sólidos de la pulpa se incrementa, mediante espesadores, a más del 50%. Esto reduce la segregación por tamaño de partícula y tiende a reducir tanto la estratificación como la reducción sistemática del tamaño de partícula en función de la distancia desde el punto de descarga. La segunda, es para relaves molidos a tamaños muy finos y que tienen un mínimo contenido de arena para empezar, los relaves de cianuración de oro y plata corresponden a este tipo según lo describe Lefebvre y Dastous (1991). En tales casos, cualquier playa de arena puede ser tan angosta como 30 a 50 metros, con el remanente del depósito constituido por lamas más o menos uniformes. El último caso es cuando los ciclones son utilizados para separar y

eliminar arena de los relaves de la concentradora, ya sea para su uso en la construcción de la presa o como relleno en las minas subterráneas. Este dispositivo, mostrado en la Figura 1.2(a) opera según los principios centrífugos y separa la pulpa de relave alimentada en una descarga por abajo («underflow») (arenas que contienen entre 5 y 30% de material más fino de 0.074mm) y otra por arriba («overflow» o rebose) que se descarga al depósito de relaves. Si el cicloneo se realiza en forma continua y no es interrumpido por descargas de relaves sin ciclonear, entonces los relaves depositados a partir del rebose (overflow) estarán conformados por lamas uniformes en su mayoría.

Las características granulométricas de varios tipos de relaves se muestran en la Figura 1.3 para minerales de cobre, plomo, zinc, oro y plata. Los relaves globales son el material producido en la concentradora antes de la descarga, mientras que la distribución granulométrica mostrada para las lamas reflejan segregación en la deposición, cicloneo y molienda fina en varios casos. La granulometría de los relaves arenosos en la zona de playa es similar a aquella mostrada por la descarga inferior del ciclón en la Figura 1.2(b) y (c) pero generalmente con un contenido más alto de finos.

La granulometría del relave global queda determinada por el proceso de molienda en la concentradora, el cual generalmente, se optimiza para maximizar la recuperación del metal. Desde una perspectiva más amplia esto puede ser contraproducente, pues da lugar a relaves que tienen características menos favorables para la deposición. Por ejemplo, la fineza de molienda requerida para incrementar la recuperación en sólo 2 a

3% puede incrementar los finos en los relaves de 10 a 15 puntos en porcentaje. No solamente el incremento en el valor metálico puede verse largamente superado por los mayores costos de equipo, mantenimiento, suministros, y energía requerida para moler a tamaños más finos sino que los relaves más finos reducen la disponibilidad y recuperación de la arena cicloneada que puede ser útil como relleno en las labores

subterráneas o como un material de bajo costo para la construcción de la presa de relaves. Especialmente para las minas subterráneas del Perú, la molienda debe basarse no solamente en una óptima recuperación del metal sino en la óptima combinación de la deposición de relaves, el método de minado y los factores de recuperación, tomados todos en conjunto.

#### b) Propiedades Estructurales

Las propiedades estructurales son aquellas características geotécnicas de los depósitos de relave que gobiernan su comportamiento frente a la estabilidad, infiltración y deformación. Las propiedades estructurales básicas, incluyen resistencia, permeabilidad y compresibilidad, y en el caso de los depósitos de relaves éstas propiedades dependen notablemente de si predominan las arenas o las lamas, y del grado de interstratificación. Valores típicos de la densidad «in situ», resistencia, permeabilidad, índice de compresión, y coeficiente de consolidación, han sido reportados por Vick (1990) y sólo se ofrecen aquí algunas generalidades. La resistencia de los relaves arenosos está mejor

representada por el ángulo de fricción interna el cual es mayor que el de la mayoría de suelos naturales debido a la angularidad de las partículas del relave que la molienda produce. Las lamas, sin embargo, son débiles y compresibles, y la baja resistencia al corte del material sin drenaje, determina su comportamiento (Ladd, 1991 y Vick, 1992).

La permeabilidad de los relaves arenosos varía aproximadamente de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  cm por segundo, mientras que las lamas oscilan en el rango de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm por segundo, dependiendo de la presión total efectiva a que estén sometidos; una relación muy útil está dada por la fórmula de Hazen's:

$$k = (d_{10})^2$$

donde k es la permeabilidad en centímetros por segundo y  $d_{10}$  es el tamaño de abertura en milímetros por el que pasa el 10% del material. Esta relación ha probado ser muy exacta para relaves de metales básicos y metales preciosos de todos los tipos. Proporciona la permeabilidad de los estratos individuales mas no, necesariamente, del relave como un todo pues este depende de la interstratificación. La permeabilidad de los depósitos interstratificados de arenas y lodos es gobernada por aquella de las arenas, debido a la interconexión de los estratos más permeables y las zonas que proporcionan vías que controlan la infiltración.

Los relaves arenosos drenan por gravedad después que el agua empozada es extraída de la superficie de un depósito y si están sobre un material razonablemente permeable, su humedad gravimétrica residual disminuye aproximadamente 5% a 15%. Las lamas, sin embargo, no responden al drenaje por gravedad debido a las altas fuerzas de capilaridad asociadas con el pequeño tamaño de las partículas. Las evidencias de campo muestran que por debajo de la zona de desecación superficial, los lodos originalmente depositados bajo agua, retienen su contenido original de agua (25% a 35%) y permanecen virtualmente saturados en su totalidad por períodos de hasta 90 años, aún en climas secos. Esta conducta de la saturación ha sido confirmada aún en los desiertos peruanos (Arequipa) en donde estratos de lamas saturadas permanecen a solamente 1.6 metros por debajo de la superficie de un depósito de relaves inactivo por más de 35 años (Villachica y Sinche, 1984).

La deposición hidráulica ordinaria de arenas y lamas produce bajas densidades «in situ» y condiciones sueltas y blandas, tal como lo indican los resultados de la Prueba Estándar de Penetración (Seed y asociados, 1985) con promedios típicos entre 5 a 10 para playas de arenas recientemente depositadas y entre 1 y 3 para lamas. Bajo condiciones de total saturación esto indica que ambos tipos de relaves son susceptibles de perder resistencia durante licuefacción sísmica, y este factor tiene la máxima importancia con relación a casi todos los aspectos del manejo de relaves en el Perú.

### 3. Características Químicas

Es aparente, desde un punto de vista físico que los relaves son un material manufacturado y la naturaleza básica del proceso admite algunas generalizaciones razonables sobre el asunto. Esto no es así, con respecto a las características químicas que pueden variar ampliamente de un yacimiento a otro. A este respecto, es importante anotar que varios depósitos de características diferentes, cada uno con distinta geoquímica, pueden ser explotados a lo largo de la vida de la mina, ocasionando las variaciones correspondientes en las características químicas de los relaves producidos.

#### a) Relaves Sólidos

Para muchos depósitos minerales polimetálicos altamente sulfurados en el Perú, las diferencias en la gravedad específica de las partículas de minerales individuales pueden afectar la distribución de varios metales, incluyendo la de pirita, de acuerdo a las diferentes fracciones de tamaño de los relaves. Villachica y Parra (1980) notaron que las partículas sulfurosas más pesadas eran separadas preferencialmente con las partículas más gruesas durante el procesamiento en la concentradora, en tal forma que ello ocasionaba la sobre-molienda de los sulfuros a partículas mucho más finas. Esto, tiende a concentrar los minerales más pesados tales como galena y pirita en las partículas finas de los relaves como se muestra por comparación de las curvas de alimentación y rebose del clasificador en la Figura 1.4. La distribución de metales como una función del tamaño de partículas en dos concentradoras peruanas, se muestra en las Figuras 1.5a y b. La distribución por tamaño de metales individuales en los relaves de un número de minas polimetálicas peruanas se muestran en las Figuras 1.6 y 1.7. Este efecto de tamaño de partícula y densidad tiene influencia en la distribución granulométrica de la concentración de metal sólido dentro del depósito de relaves, y las propiedades estructurales relacionadas con el tamaño de la partícula, tales como permeabilidad y la retención de humedad por largo tiempo, también pueden afectar preferencialmente la movilidad de cualquier especie metálica soluble así como la generación y movilidad de productos de la oxidación de sulfuros. Otro resultado de este efecto del tamaño de la partícula puede ser la influencia que tiene sobre el contenido metálico de los sólidos ultrafinos que pueden mantenerse en suspensión en el agua de proceso de los relaves, como se discutirá en la siguiente sección.

#### b) Efluentes Líquidos de Flotación

La primera consideración relacionada a los efluentes líquidos y su calidad, es el contenido de sólidos muy finos en suspensión el cual es usualmente medido como sólidos totales en suspensión (TSS) o menos frecuentemente como unidades de turbidez. Los niveles elevados de TSS en los efluentes descargados en algunas minas en el Perú resultan de la retención por tiempo limitado y sedimentación en pequeños depósitos. Estos contenidos son más fáciles de reducir si se incrementa el tiempo de retención en los depósitos mencionados para este propósito y se recircula el agua de proceso hacia la concentradora, eliminando del todo la descarga de agua de este depósito. Por otro lado, los floculantes (polímeros sintéticos) coagulantes (Fe, Al y sales) y reactivos químicos para ajustar el pH (cal) pueden ayudar a la reducción de las partículas suspendidas. La filtración a través de filtros de arena, que pueden utilizar las arenas de relaves cicloneados como medio filtrante, han sido también sugeridas como un medio para reducir las partículas ultra-finas en suspensión.

Los residuos de reactivos utilizados en flotación acompañan tanto a los relaves sólidos como a los líquidos descargados con los relaves. Los reactivos de flotación pueden ser cal, ditiofosfatos, xantatos, cromatos, sulfitos, sulfato de cobre, sulfato de zinc, ácidos grasos, alcoholes, aceites y cianuro entre otros, dependiendo del requerimiento metalúrgico específico de cada operación. Con la excepción del cianuro (que se discute por separado más abajo) la mayoría de los demás reactivos de flotación existen en formas no tóxicas para los humanos y la vida acuática. Generalmente se aplican en pequeñas concentraciones en las operaciones más eficientes; los reactivos orgánicos de flotación se descomponen rápidamente y son rara vez responsables de algún impacto ambiental serio.

El proceso de flotación puede también liberar otros constituyentes en solución, dependiendo de la extensión en la cual éstos puedan estar presentes en el mineral y de su solubilidad. Esto incluye frecuentemente sulfatos y cloruros pero a menudo dentro de límites aceptables para agua de bebida y usos acuáticos. Más importantes pueden ser los metales potencialmente tóxicos, tales como arsénico y selenio (sólo si están presente en el mineral) que pueden ser solubles cerca del pH neutro. Aún los niveles ligeramente elevados de cobre, plata, plomo, aluminio y zinc en solución pueden ser especialmente dañinos para los peces salmónidos, además del riesgo potencial de ser acumulados en los tejidos de los organismos marinos. Algunos de éstos metales pueden ser tóxicos para el consumo humano en mayores concentraciones; otros metales como el cobalto, molibdeno, y níquel pueden afectar adversamente el crecimiento de las plantas o del ganado si están presentes en las aguas usadas para irrigación.

Las pruebas para estimar el tipo y concentración de tales constituyentes solubles se realizan con anterioridad al arranque de la concentradora, utilizando muestras de relaves que se han tenido en agua por varias semanas o varios meses. Puesto que éstas pruebas son realizadas con un número determinado de muestras de mineral usado en las pruebas metalúrgicas, puede ser difícil determinar la extensión en la cual ellos son representativos de todo el cuerpo mineralizado. Otras variables son el pH y la exposición a la atmósfera y puede por ello ser difícil reproducir en la prueba todo el rango de condiciones reales. Durante la operación de la concentradora el pH es usualmente mantenido en el rango de 8 a 11, lo cual disminuye la solubilidad de muchos metales; sin embargo, el pH de las aguas del depósito será casi neutro en el largo plazo. Finalmente, las pruebas con muestras a nivel de planta piloto no contendrán, generalmente, concentraciones de nitratos procedente de los agentes explosivos que están en cambio presentes en las operaciones actuales de las minas. Estos factores pueden producir considerable duda en la predicción, tanto de la calidad de los efluentes en el corto como en el largo plazo, debido a la lixiviación ácido de los constituyentes solubles de los relaves.

La dificultad en predecir exactamente el contenido metálico del efluente con anterioridad a la operación y los rangos que pueden presentarse, se ilustran en el cuadro 1.7 de la información de minerales polimetálicos peruanos que comúnmente producen altos niveles de metales disueltos en los efluentes de planta. Las especies solubles son liberadas por la exposición del mineral al aire y al agua junto con niveles altos de pirita, la cual es más noble que otros sulfuros y crea la disolución galvánica de plomo, zinc, arsénico, etc. La oxidación se produce con la trituración y la molienda en el ambiente atmosférico, resultando en que las corrientes de efluentes tienen metales disueltos semejantes a aquéllos mostrados más abajo y que pertenecen a cuatro operaciones peruanas (Villachica y Asociados, 1993).

Comparando los efluentes 1 y 3 en el cuadro 1.1, por ejemplo, se puede ver que el tiempo de retención en la laguna de relaves decrece notablemente los niveles de metales disueltos y el pH. De otro lado, el efluente 2 del espesador de concentrados en la misma operación tiene niveles mucho más altos de metales disueltos, en adición a reactivos orgánicos y otros que como el bicromato allí se acumulan.

El cuadro 1.1 también enfatiza claramente la importancia de recircular toda el agua de proceso del depósito de relaves a la planta concentradora a fin de evitar la descarga con pH y nivel de metales disueltos incluyendo el cobre; por ejemplo el efluente 1 (usualmente sobre 10.5 de pH cuando se flota zinc en adición al cobre y plomo). Ambos factores pueden afectar al plomo y al zinc en su recuperación y la selectividad cuando se tratan minerales frescos, de tal manera que la recirculación de agua requiere usualmente un espesador intermedio de relaves (Villachica y Asociados, 1993). Sin embargo, tomando ventaja del depósito de relaves como un reservorio regulador, puede lograrse agua de calidad conveniente para tratar mineral fresco (ejemplo: efluentes 3, 4 y 6); es también evidente que el tratamiento por separado del agua proveniente de la deshidratación de los concentrados (efluentes 2 y 5) es conveniente.

En casos en los cuales los factores climáticos, topográficos y de balance hídrico hacen necesaria la descarga directa de los efluentes de relaves hacia aguas receptoras, los Límites Máximos Permisibles establecidos por el Ministerio de Energía y Minas determinarán las

necesidades de tratamiento de los efluentes. Aunque se dispone de métodos para eliminar aniones tales como los cloruros, sulfatos y nitratos, ello es muy costoso y rara vez practicable en el contexto minero. Sin embargo, existen métodos factibles de tratamiento para eliminar el arsénico. Estos, son revisados por Twidwell y sus colaboradores (1994) y el tratamiento de efluentes de relaves mediante la coprecipitación férrica, ha sido descrito por Krause (1992) y por Domville y Henry (1992). Investigaciones actuales sobre las técnicas para eliminar el selenio son descritas por Altringer en 1991.

Es importante anotar que los efluentes discutidos en esta sección son aquéllos que resultan exclusivamente del procesamiento de minerales y de la concentración. Si los relaves son susceptibles de generar ácido a partir de la oxidación de sulfuros después de su deposición en el depósito, entonces pueden ocurrir problemas muy serios y completamente diferentes debido a la generación ARD, tal como se discute en el punto d).

### c) Efluentes Cianurados

Como uno de los pocos componentes conocidos que disuelven al oro y la plata, el cianuro de sodio es usado como lixiviante en la mayoría de las operaciones para beneficiar oro y plata, y muchas veces como un reactivo en los procesos de flotación. La química del cianuro es compleja pero bien conocida y aunque está fuera de los alcances de esta Guía, presentamos aquí una breve introducción a este tópico.

El cianuro en los efluentes de los relaves incluye cianuro libre (CN y HCN), así como formas complejas en asociación con varios metales que tiene variada solubilidad y toxicidad. El cianuro libre es químicamente inestable. Por lo tanto, a diferencia de muchos otros contaminantes, no persiste en el ambiente ni tampoco es bio-acumulable a través de la cadena alimenticia. En efecto, el cianuro está presente en muchos alimentos comestibles, tales como las almendras y los frijoles, y es realmente metabolizado por muchos organismos en concentraciones similares a aquéllas que se encuentran en algunos efluentes de relaves (Howe, 1984).

Un número de procesos naturales contribuyen a la natural degradación del cianuro libre, incluyendo volatilización, oxidación, fotodescomposición, y degradación microbiana (Simovic, et., al., 1984). De éstos, la volatilización es la más importante y se incrementa notablemente conforme el pH inicialmente alcalino de los efluentes cianurados se va transformando en neutro a medida que el tiempo de retención en el depósito de relaves se incrementa. El cianuro usado en pequeñas cantidades como un reactivo de flotación para la depresión del cobre, por ejemplo, en circuitos de cobre y plomo, resulta típicamente en concentraciones de 5 a 10 mg/l en los efluentes de los relaves (Von Michaelis, 1984), estas concentraciones son casi siempre rápidamente reducidas por los procesos naturales en las pozas de decantación de los depósitos de relaves y alcanzan niveles por debajo de los estándares de agua de bebida establecidos por la EPA, que son de cerca de 0.2 mg/l de cianuro libre (CN<sup>-</sup>). Por razones similares, el cianuro de flotación es rara vez medido en concentraciones detectables en las pruebas de envejecimiento de relaves de lixiviación discutidos anteriormente. Como resultado, los procesos naturales son usualmente considerados adecuados para mitigar los efectos ambientales del cianuro de los relaves de flotación, excepto donde los requerimientos para proteger el agua superficial o subterránea son inusualmente severos o cuando hay poco o ningún tiempo de retención en el depósito, con anterioridad a la descarga.

Las alternativas al cianuro como un inhibidor del cobre en los circuitos de separación Cu - Pb por flotación ha sido el objeto de extensas investigaciones en algunas minas del Perú. El bisulfito y el dicromato son menos contaminantes, y además el bisulfito es producido localmente.

Otras estrategias de la flotación colectiva - selectiva usando una planta de separación centralizada de cobre y plomo también ha sido propuestas (Villachica, 1981). Finalmente, la mayor selectividad de mineral en operaciones subterráneas polimetálicas puede permitir el procesamiento por separado de minerales de plomo y cobre con el uso sustancialmente reducido del cianuro. La mayoría de las plantas de flotación en el Perú reportan niveles de

cianuro en los efluentes descargados por debajo de los límites de detección. Sin embargo, los métodos analíticos usados normalmente (Nitrato de plata - ioduro de potasio) tienen un límite de detección de 1 mg/l, y se requiere por ello de métodos más sensibles.

En contraste con su uso en concentraciones limitadas como reactivo de flotación, el cianuro en la extracción de oro y plata se usa en concentraciones de varios cientos de miligramos por litro. Mientras que el proceso natural de degradación opera en los depósitos de relaves que contienen estos efluentes, ellos por sí solos son rara vez suficientes para alcanzar reducciones en el grado deseado y los niveles de cianuro en las pozas de relaves donde se decanta el agua pueden permanecer en concentraciones que van de 1 a 30 mg/l (Scott, 1984), estos niveles pueden ser tóxicos para los animales acuáticos y terrestres y exceder los niveles aceptables para agua de bebida. Como resultado, se requiere controlar la infiltración o drenaje de los depósitos durante la operación, a fin de proteger el agua del subsuelo, a menudo por medio de recubrimientos como es discutido en el Capítulo VII. Si por condiciones climáticas o consideraciones del balance de agua se hace necesaria la descarga de los efluentes a las aguas superficiales, entonces debe considerarse alguno de los tratamientos que están disponibles para la destrucción del cianuro, tales como la clorinación alcalina, el proceso INCO anhídrido sulfuroso-aire, el proceso Degussa de peróxido de hidrógeno, acidificación, y tratamiento en bioreactores bacterianos (Scott, 1984). En regiones áridas del oeste de los Estados Unidos, la lechuza salvaje migratoria es atraída hacia el agua de los depósitos de relaves de oro y plata. Aunque la población de estos pájaros no es afectada, como un todo, a menudo se produce la muerte de algunos. En ciertos casos la única mitigación totalmente efectiva ha sido cubrir el agua con una red.

Estos problemas de cianuro en el manejo de los relaves de cianuración de oro y plata se presentan mayormente en el cortoplazo, durante las fases de operación, y en menor medida, en la fase de clausura. En el largo plazo durante el período de post-clausura, la degradación natural del cianuro proporciona un medio pasivo de protección para restringir el potencial de los impactos por cianuro sobre el ambiente, y usualmente no se adoptan medidas especiales de cierre para los depósitos de relaves.

Por el contrario, exactamente lo opuesto ocurre para los problemas ARD, los cuales afectan muy seriamente el período de post-clausura de las operaciones como es discutido en la siguiente sección.

#### d) Drenaje Acido (ARD) de Relaves

Una discusión completa de los problemas de drenaje ácido (o ARD) está más allá de los alcances de esta Guía. Cuando ello ocurre, estos problemas afectan todos los residuos del proceso minero, incluyendo el agua de mina y los echaderos de desmonte así como los relaves, y la estrategia de control del ARD para cualquiera de estos tipos de residuos no puede considerarse aisladamente. Sin embargo, se requiere algunos antecedentes sobre el tema del ARD para entender adecuadamente el manejo de los relaves, y en esta sección damos una introducción muy simplificada. En efecto, el planeamiento para el manejo de relaves no puede ser iniciado hasta que haya por lo menos una indicación de que los problemas de ARD puedan ocurrir o no.

El ARD se refiere a procesos por los cuales el pH del agua en contacto con los relaves puede disminuir severamente, dando como resultado la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos tales como arsénico, plomo, cadmio, y un conjunto de otros, además un drástico incremento del contenido de los sulfatos. Es casi imposible detener completamente el proceso una vez que se ha iniciado, y los efectos de la acidificación pueden continuar por muchos siglos, así sucedió en el distrito de Río Tinto en España, explotado por los romanos, y en cuerpos mineralizados suecos trabajados poco después de la época de los Vikingos, hace 1000 años. El ARD puede ser el tema ambiental asociado al manejo de relaves potencialmente más dañino y difícil de tratar, y puede no ser evidente aún muchos años después del período de cierre de operaciones. Más que ningún otro asunto, el potencial para ARD es específico para cada cuerpo mineralizado y para sus condiciones físicas y climáticas; no hay reglas

generales para predecirla, en cualquier depósito sin el auxilio de pruebas geoquímicas. Existen, sin embargo, varios requisitos para que este proceso ocurra.

La primera condición necesaria para el ARD es que los minerales sulfurados estén presentes en los relaves, principalmente pirita, pero también otras formas aún más reactivas tales como la pirrotita y la marcasita. Esto puede ser determinado frecuentemente en forma cualitativa a partir de la información geológica respecto al cuerpo mineralizado, pero otra señal puede ser la alta gravedad específica de los relaves. Aunque los relaves de los minerales metálicos están compuestos principalmente de minerales de silicato o carbonato con gravedad específica (Gs) de 2.65-2.85, ellos contienen al menos pequeñas cantidades de metales no recuperados y hierro del proceso de molienda (barras de acero o bolas) que típicamente resultan en una gravedad en el rango de 2.8-2.9 para los minerales bajos en sulfuros. Por contraste, los relaves altos en sulfuros a menudo exceden considerablemente este rango, con una gravedad específica que a menudo se ubica sobre 3.5, por ejemplo, para el caso de los relaves polimetálicos peruanos que normalmente contienen de 10 a 60% de pirita.

En presencia de aire, la segunda condición, las superficies del mineral sulfurado se oxidan en una reacción compleja que involucra varios pasos químicos ayudados por bacterias, para formar ácido sulfúrico. Sin embargo, esta reacción por sí sola causará grandes problemas sólo si los relaves contienen cantidades insuficientes de otros minerales que consumen ácido (por ejemplo, carbonato de calcio) para neutralizar el ácido, lo cual es la tercera condición necesaria. La condición final es que los contaminantes producidos deben ser transportados de los depósitos de relaves hasta los terrenos receptores o aguas superficiales, usualmente por infiltración y drenaje. Considerando el conjunto de estas cuatro condiciones que son necesarias y suficientes para que se presente el problema del ARD, existe la posibilidad de que no se presenten problemas serios si uno de ellos está ausente.

Cada uno de estos cuatro factores es altamente específico para cada cuerpo mineralizado y para el marco ambiental del depósito de relaves. Una prueba inicial del tipo indicativo para predecir los ARD, conocida como la balance ácido base o ABA (Acid-base accounting), se utiliza para determinar si existe suficiente cantidad de minerales que consuman ácidos para neutralizar la cantidad total de ácido producida en el largo plazo.

Aún si esto fuera así, el ARD puede desarrollarse en el corto plazo si el ritmo de producción de ácido excede el ritmo de consumo de ácido en un momento dado y, en tal caso, es necesario correr pruebas del tipo cinético en celdas de humedad que simulen condiciones ambientales.

Los resultados representativos de tales pruebas requieren aún más minuciosidad que las pruebas ordinarias de tratamiento ácido de los relaves (leaching) discutidos anteriormente. La propia naturaleza de la mayoría de los cuerpos mineralizados es tal que la mineralización y la geoquímica de la roca varían considerablemente en tipo y/o grado aún en distancias muy cortas. Un programa de pruebas de ARD conducido seriamente requiere un programa de muestreo estadísticamente representativo de los testigos de exploración, lo cual puede resultar difícil, costoso y requerir mucho tiempo a menos que esté integrado con el programa de exploración geológica del cuerpo mineralizado mismo; la prueba debe reflejar además el plan actual de minado que se está desarrollando. A menudo, algunas partes del mineral a ser minado pueden producir

condiciones para ARD mucho más adversas que otras, y tal programa de pruebas puede permitir un manejo selectivo de los relaves que resultan o sugerir modificaciones a las secuencias de minado que minimicen los problemas del manejo de relaves. Pero aún el más sofisticado de estos programas tiene limitaciones. Hablando genéricamente, es razonablemente posible, de acuerdo a las técnicas disponibles, predecir cualitativamente si hay la posibilidad o no de que ocurran problemas de ARD con los relaves. Sin embargo, predecir cuantitativamente la magnitud, severidad y oportunidad de tales problemas es muy difícil e incierto.

Si existe potencial para ARD, hay varias medidas de mitigación que pueden ser consideradas. Aunque la discusión detallada de este punto está reservada para el Capítulo 7, podemos

indicar que muchas de estas técnicas adoptan uno o más de los siguientes principios que se resumen a continuación en forma muy simplificada:

La oxidación de sulfatos puede ser iniciada únicamente si existe oxígeno en los intersticios del depósito de relaves y pueden por lo tanto ser prevenido si este oxígeno es eliminado. Una manera efectiva de hacerlo es manteniendo los espacios vacíos llenos con agua y el depósito totalmente saturado.

La oxidación de los sulfatos también puede ser retardada si el ingreso del oxígeno al depósito es restringido, por ejemplo, cubriendo la superficie del depósito de tal manera que la velocidad de difusión del oxígeno a través de la cobertura sea menor que el requerimiento de oxígeno por las reacciones químicas de ARD. Aún si el ARD se ha iniciado dentro del depósito, la dispersión de sus efectos puede ser reducida si hay insuficiente infiltración para transportar los constituyentes disueltos más allá de los límites del depósito mismo. La infiltración puede también ser reducida por coberturas, en combinación con la derivación del agua superficial y un apropiado tratamiento de la superficie del depósito.

Estos principios son importantes para comprender los aspectos de ARD relacionados con los métodos alternativos de disposición de relaves que serán discutidos a continuación. Otro factor significativo que influencia estos métodos es la ubicación geográfica, la cual se discute en el siguiente capítulo.

## CARACTERISTICAS GEOGRAFICAS

### Capítulo II. CARACTERISTICAS GEOGRAFICAS DEL PERU

#### 1. Características Fisiográficas

Las características geográficas del Perú están entre las más variadas del mundo y afectan profundamente tanto las operaciones mineras en general, como los requerimientos del manejo de relaves en particular. El país puede ser dividido en varias provincias fisiográficas como las describe la ONERN (1986) y como se muestra en la Figura 2.1.

La zona costera se extiende a lo largo del país frente al Pacífico hasta 50 a 100 km. tierra adentro donde los Andes se levantan dramáticamente a elevaciones de más de 6,000 m. La actividad minera en esta zona es favorecida por su relativa accesibilidad al océano y al transporte terrestre. La sierra, o los altos Andes, ha sido la ubicación de gran parte de la actividad minera (algunas a elevaciones sobre los 5,000 m.) con sistemas que incluyen las Cordilleras Oriental y Central y los grandes plateaus o planicies del Altiplano, en el Sur. Estas cordilleras mayores, que contienen un número de volcanes activos y recientemente activado, están dominados por glaciales y características periglaciales en las más altas elevaciones, con valles y cuencas muy pronunciados. Esta topografía hace más valiosa la existencia de lugares apropiados para depósitos superficiales de relaves mineros en los valles estrechos y las tierras altas requiriendo algunas veces diques altos con ritmos muy rápidos de levantamiento y tunelería para desviar las aguas superficiales hacia los valles adyacentes (Brawner, 1979).

Más hacia el Este, los Andes descienden hacia los bosques de la Selva Alta a elevaciones que van de 400 a 1,000 m. y finalmente a las selvas tropicales de la Selva Baja o Llano Amazónico. La Selva Alta contiene un número de minas medianas y pequeñas mayormente auríferas primarias con plantas de cianuración, mientras que la actividad minera en la Selva Baja está generalmente limitada a placeres muy pequeños de oro y a operaciones de dragado. Sin la existencia de carreteras en la Selva Amazónica el transporte está limitado al aire y al río.

#### 2. Clima

Los factores climáticos afectan el manejo de relaves en varias formas importantes. La lluvia y los deshielos controlan el manejo del agua y los requerimientos extremos de inundación para los depósitos de superficie y, junto con la evaporación, influyen la movilidad del contaminante y aún las propiedades físicas de los relaves depositados. Las características

climáticas del Perú varían en una escala aún más amplia que las características fisiográficas. De acuerdo a una clasificación esquemática del clima, 8 de los 11 tipos de clima del mundo se encuentran en el Perú

El clima a lo largo de la costa está dominado por los efectos de las corrientes oceánicas. Directamente en la orilla se encuentra una franja de agua anormalmente fría para esta latitud y aunque está asociada con la corriente de Humboldt que corre hacia el norte, la franja de agua fría consiste realmente de agua insurgente de las profundidades del océano. Esta agua fría de la orilla da mucha estabilidad a las condiciones atmosféricas, de tal forma que la lluvia es muy pequeña o no existe. Al mismo tiempo, sin embargo, de junio a octubre en el invierno hay un fuerte desarrollo de nubes bajas o finas capas de niebla (garúa) que impide la acción de la luz solar y retarda la evaporación. Por ejemplo, Lima tiene un promedio de precipitación anual de sólo 5 cm. con cobertura de nubes del 70% del año; cifras similares de 3 cms y 60% se registran en Tacna, al Sur (Meigs, 1966). La desértica costa peruana se muestra en la Figura 2.2, junto con la zona árida que se extiende tierra adentro por una distancia de 30 a 50 km., con excepción de una expansión hacia el Este (dentro del Altiplano) en el Sur. Esta zona es contigua al Desierto de Atacama, el desierto costero más seco del mundo donde la lluvia puede caer con intervalos de muchas décadas y es insuficiente para soportar toda vegetación hasta elevaciones tan altas como los 2,500 mts en las laderas de los Andes.

Los efectos del Océano también controlan la precipitación extrema en esta región. La contracorriente tibia El Niño aparece anualmente desde el Norte, pero ocasionalmente con intervalos de 7 o más años alcanza distancias mucho mayores hacia el Sur. Esta masa de agua tibia produce inestabilidades atmosféricas que han resultado en lluvias torrenciales e inundaciones aún en áreas que no han tenido lluvias por un año. Por ejemplo, durante uno de los peores años de El Niño en 1925, Lima experimentó lluvias de 152 cm., más de 30 veces el promedio anual, y la costa norte tuvo más lluvia que en todos los 10 años anteriores (Meigs, 1966). Esto muestra claramente que los largos intervalos entre lluvias no garantizan la ausencia de intensa precipitación para los depósitos de relaves y las consiguientes posibilidades de inundación.

En el resto del país, el mismo efecto El Niño que produce intensas lluvias periódicamente en la región costera, produce similares efectos en la Selva y sequía en la Sierra. Normalmente, sin embargo, los climas tropicales y subtropicales en el norte y centro de la Selva se mantienen en una zona de convergencia de baja presión, con lluvias anuales de 3,000 a 4,000 mm. En la Sierra, las condiciones son normalmente semi-áridas, aunque las lluvias y nevadas son controladas mayormente por la elevación y efectos orográficos. La precipitación promedio anual en la Sierra va desde la vecindad de 300 mm en el Sur a 900 mm en el Norte con nieve sobre los 3,500 m. de elevación .

Los datos meteorológicos del Perú son muy limitados y es raro encontrar registros de más de 30 a 40 años en una estación determinada. 700 estaciones se instalaron entre 1960 y 1964 con fondos de las Naciones Unidas, y en 1980, la existencia de 934 estaciones (526 para lluvias y 408 climatológicas) ha sido determinada. Desde esa época sin embargo, la falta de mantenimiento y de personal han limitado las actividades en esa área y se desconoce cuántas estaciones sobreviven o si la información es confiable. Como resultado, existe, inusualmente, gran incertidumbre en los parámetros del balance de agua y en las estimaciones de inundaciones extremas para propósito del diseño de depósitos de relaves superficiales. En general, esto indica que los factores sensitivos a los valores de diseño de los flujos de entrada no deben ser confiables para la estabilidad hidrológica de los depósitos, especialmente para las condiciones posteriores a la clausura de la mina. La ubicación adecuada para evitar los flujos producidos por las inundaciones, antes que las consideraciones de ingeniería para contrarrestarlas, debe ser la primera línea de defensa en el Perú.

En base a la información disponible, la Figura 2.3 presenta un resumen del promedio anual de lluvia en el Perú y la Tabla 2.1, más adelante, nos dá algunos promedios generalizados anuales de precipitación y evapotranspiración estimadas. Estos valores intentan proporcionar solamente una vista regional amplia, panorámica; como se explica más adelante , la información específica respecto al sitio es requerida para el diseño de depósitos de relaves en cada caso.

### 3. Sismicidad

El Perú está ubicado en una de las áreas sísmicamente más activas del mundo y los terremotos han afectado las minas desde su comienzo en el país. Cuando un tsunami acompañó el primer gran terremoto experimentado por Lima en 1586, se esparció el temor que los depósitos de mercurio, necesarios para mantener la producción de oro, se hubieran perdido. Estos temores fueron percibidos más tarde cuando el gran terremoto de 1687 afectó la mayor parte de Lima y el subsiguiente tsunami destruyó las reservas de mercurio a todo lo largo de la costa, desde Lima a Puerto Caballas (Dorbath, et. al., 1990).

Como lo muestran estas anécdotas, el récord de terremotos en el Perú es remarcable no sólo por la dimensión de los eventos que han ocurrido sino también por su rango de casi 400 años. Desde 1582 a 1974 han habido 18 terremotos entre grandes y mayores causados por subducción con magnitudes entre 7.5 y 8.8 como se muestra en el cuadro 2.2 siguiente.

En la historia sísmica más contemporánea, Alva y sus Asociados (1985) han reunido información técnica de 29 terremotos de magnitud 4.9 a 8.4, los cuales, con sólo tres excepciones, ocurrieron entre 1912 y 1981. Las intensidades combinadas de la Escala Modificada de Mercalli se muestran en la Figura 3.4. Un catálogo de eventos instrumentalmente registrados de 1900 a 1984 han sido compilados por Espinosa, et. al, 1985.

Aunque los terremotos destructivos son generados por deslizamientos de fallas superficiales (de menos de 33 km. de profundidad focal) en casi todo el Perú la mayoría de los terremotos de mayor magnitud se ha producido por la subducción de la Placa de Nazca dentro de la Falla Peruana que está justo fuera de la costa y por debajo de la Placa Sudamericana. La zona de subducción corre bajo la mayor parte del país (Chowdury y Whiteman, 1987; Nishenko, 1985; Hasegawa y Sacks, 1981). Basados en el análisis de los grandes eventos de subducción que se muestran en el Cuadro 2.2 y sus intervalos de recurrencia, Dorbath en 1990 propuso las siguientes tres regiones para los límites de la placa debajo del Perú:

Una región de subducción norte con largos intervalos de recurrencia para terremotos de subducción.

Una región central de subducción con una secuencia compleja de ruptura que se quiebra bien como un todo o como pequeños segmentos, pero que pueden permanecer en quietud por períodos tan largos como 200 años.

Una subducción de la región sur que experimenta entre grandes a muy grandes eventos más regularmente, con intervalos de recurrencia en el orden de los 100 años.

Esas regiones de las zonas de subducción son generalmente consistentes con las interpretaciones geofísicas de Hasegawa y Sacks (1981) mostradas en la Figura 2.5(a) las cuales fueron hechas a partir del monitoreo microsísmico realizado durante 1965. Las tres áreas rectangulares principales, que se muestran en la figura corresponden aproximadamente a las regiones descritas más arriba. Una sección transversal debajo del Perú a través de la región central en la Figura 2.5(b) muestra que la zona de subducción aquí se sumerge y luego se horizontaliza con el potencial para afectar la mayor parte del país. Esta configuración varía, sin embargo, y la Figura 2.5(c) muestra cómo la geometría de la placa, cambia a lo largo del país de acuerdo a esta interpretación.

Además de los mecanismos de subducción entre placas, los terremotos peruanos son también producidos por deslizamientos poco profundos de fallas dentro de las placas como se deduce de la acumulación de eventos con 0 a 50 km. de profundidad focal en la Figura 2.5(b). Sebrier en 1985, por ejemplo, documenta varias de esas fallas activas, normales e inversas en el sur del Perú. El riesgo sísmico global en cualquier ubicación, se deriva, por lo tanto, de la superposición tanto de las fallas de la corteza con los mecanismos y lugares relacionados con la subducción. Se deduce que los estimados de riesgo sísmico basados en los eventos de subducción solamente proporcionarán un límite más bajo en cualquier lugar dado, y similarmente, que los estimados derivados únicamente de los registros históricos, no tendrán necesariamente en cuenta la ruptura potencial de la falla durante los largos períodos que se consideran importantes para el diseño de los depósitos de relaves.

Además del daño directo a las estructuras por el movimiento sísmico, otros efectos de los terremotos en el Perú, son casi una leyenda. Los tsunamis han sido generados por la mayoría de los grandes terremotos con olas locales de altura de 3 a 20 m. como se indica en el Cuadro 2.2. Históricamente, éstas han sido a menudo responsables de gran parte de la destrucción de las áreas costeras peruanas y han sido registradas tan lejos como Hawai y Japón. Los tsunamis que acompañaron a los terremotos de 1604 y 1868 en el sur del Perú se encuentran entre los más grandes jamás observados en el Océano Pacífico (Nishenko, 1985; Dorbath, 1990).

Las avalanchas generadas por los terremotos, como los deslizamientos de tierra y los deslizamientos que embalsan a los ríos, han producido efectos catastróficos en el Perú con alguna regularidad. El terremoto de grado 7.9 del 31 de mayo de 1970 ocasionó que entre 50 y 100 millones de metros cúbicos de glacial y roca se desprendieran desde un abismo vertical del Nevado Huascarán, la montaña más grande del Perú. Deslizándose a lo largo de un glacial y lanzándose al aire, la avalancha avanzó a una velocidad estimada de 285 km/hr y en 4 minutos enterró la ciudad de Yungay y muchas otras comunidades, matando por lo menos a 18,000 personas. De acuerdo a Keefer (1984) éste fue el deslizamiento más destructivo en este siglo y tal vez en toda la historia. Casi increíblemente, una versión previa de la misma catástrofe había ocurrido 245 años antes durante el terremoto de grado 7.5 en 1725 cuando nuevamente el hielo de un glacial cayó del Nevado Huascarán y sepultó a Yungay matando a 1,500 personas (Dorbath, 1990). En cualquier otro lugar del Perú, los deslizamientos de tierra han sido promovidos por los terremotos de 1586, 1604, 1619 y 1784 algunos de ellos sepultando nuevamente villas y otros embalsando ríos, y rompiendo e inundando valles.

El peligro más grande para las instalaciones de relaves a partir de los terremotos en el Perú, se deriva sin embargo de la licuefacción sísmica la cual puede afectar tanto a los relaves saturados como a los suelos naturales saturados que están debajo de un depósito, a menos que ellos tengan una alta densidad. Además de todos los tipos de relaves, los tipos de suelos naturales incluyendo limo, arena y grava son también susceptibles de licuefacción, la misma que ocurre cuando las cargas cíclicas causan que la presión de poro en los vacíos saturados del material, se incrementen durante o inmediatamente después del sacudimiento producido por el terremoto. Esto a su vez, causa que el material pierda resistencia, experimente grandes deformaciones, y se comporte esencialmente como un fluido. Una revisión completa de los procesos de licuefacción y una revisión panorámica integrada de investigaciones recientes ha sido proporcionada por NRC (1985a).

Entre las primeras manifestaciones de licuefacción a nivel del suelo están las arenas que 'hierven', depósitos de suelo de forma cónica y agua eyectada del terreno, así como las grietas del terreno causadas por las expansiones laterales inducidas por la licuefacción. Tales características han sido reportadas en el Perú en fechas muy recientes, como el 31 de mayo de 1970 con ocasión del terremoto de ese año que dañó Chimbote (Alva y Parra, 1991). Las descripciones consistentes con estos hechos, reportados en los eventos de 1586, 1604, 1619 y 1664 entre otros, dejan muy poca duda respecto a que la licuefacción fundamentalmente ha sido producida por los terremotos peruanos con informes, por ejemplo, de grandes grietas en la tierra de la cual brotó 'agua negra y nauseabunda' y que una caravana de caballos y hombres, fue completamente tragada por las arenas movedizas (Dorbath, 1990).

Aún si fuera exagerado, los efectos de la licuefacción tal como éstos, pueden causar fallas sísmicas de los depósitos de relaves, como ya lo han

hecho varias veces en el pasado además que por lo menos 3 de estos hechos han sido reportados en el Perú. Uno de los principales objetivos del manejo de relaves en el país debe ser la prevención de fallas por licuefacción sísmica, y esto será un tema constante en las siguientes secciones de esta Guía.

## METODOS

### Capítulo III. METODOS ALTERNATIVOS PARA LA DISPOSICION DE RELAVES

El chancado y molienda de minerales genera un volumen de relaves que es, aproximadamente, dos tercios más grande que el volumen original del mineral «in situ». Dónde y cómo colocar estos relaves en forma que sea económicamente factible así como física y químicamente estable es tal vez el mayor problema ambiental, asociado con el desarrollo minero.

Históricamente, la disposición de relaves favorecía en sus orígenes a la deposición en ríos, lagos o riachuelos y, más tarde en las presas superficiales, por razones relacionadas con la evolución técnica de las prácticas revisadas en la Introducción. Más que ningún otro factor, la reciente preocupación por la post-clausura relacionada con el ARD ha estimulado el interés por métodos alternativos, tales como el relleno subterráneo y la disposición submarina, mientras que por otro lado, métodos como la disposición de relaves deshidratados tienen ventajas significativas de estabilidad física para el Perú.

El método preferido para la disposición de relaves es muy específico para cada proyecto y ubicación, la mejor solución puede ser obvia o puede requerir considerable investigación dependiendo de las circunstancias únicas de la mina, las cuales incluyen:

- ubicación de la mina y su topografía
- método de minado y geología del cuerpo mineralizado
- métodos de procesamiento y características físicas resultantes de los relaves
- características químicas de los relaves y su potencial generador de ARD
- factibilidad económica

Estos factores forman la base de las discusiones que se presentan a continuación sobre los principales métodos alternativos para la disposición de relaves.

#### 1. Depósitos Superficiales

Los depósitos de relaves superficiales son tradicionalmente los métodos más versátiles y económicos para disponer de ellos en la mayoría de operaciones mineras. Este método se basa en la deposición hidráulica de relaves, tal como se describió en el Capítulo I, detrás de una presa que puede ser construida utilizando una variedad de materiales y configuraciones. La represa es construida intentando servir el propósito fundamental de confinar la pulpa de relaves para permitir que los sólidos se asienten y el agua sea recirculada a la concentradora, en contraste con muchas operaciones existentes en el Perú en donde la recirculación es raramente practicada. Extensas discusiones de diversos factores relacionados a la ubicación, disposición y diseño de los depósitos superficiales serán presentados en los siguientes capítulos, y aquí se discutirán únicamente algunas variaciones del método básico.

Varias técnicas conocidas como disposición subaéreas, descarga de relave espesado, y disposición deshidratada son considerados aquí como variaciones de los métodos de deposición de relaves descargados hidráulicamente. Todas estas técnicas requieren de un depósito o área de disposición superficial en una forma u otra. Una revisión comparativa de los primeros dos procedimientos en relación con prácticas más convencionales son proporcionados por Lighthall (1987), y los tres son descritos separadamente en las siguientes secciones.

#### a) Disposición Sub-aérea

La disposición sub-aérea (o literalmente, «debajo del aire») se deriva de las prácticas de disposición de relaves originalmente desarrolladas y ampliamente utilizadas para lamas de oro en África del Sur. Tal como lo describe Blight (1988) y Blight y Steffen (1979), los relaves descargados en capas delgadas que se dejan secar bajo el calor de los climas calientes y secos, resultan en depósitos que tienen un alto grado de sobreconsolidación y/o presión de poros negativa (succión capilar), mejorando por lo tanto las características físicas en comparación con los lodos depositados convencionalmente.

La disposición sub-aérea en otros lugares busca reproducir estos procedimientos empleando el espesamiento de los relaves cuando es necesario; descargándolos en capas finas a partir de grifos espaciados, muy cerca uno del otro; y manteniendo una poza de decantación pequeña que se controla cuidadosamente. Como se discutió en el Capítulo I del punto 1.a, estos procedimientos tienden a reducir la segregación por tamaño de partícula en la playa ancha, lo cual puede reducir el tamaño y extensión de las zonas de arena y puede consecuentemente reducir la permeabilidad del depósito como un todo a un valor límite. Las densidades iniciales más altas pueden ser alcanzadas en las porciones superiores del depósito, dependiendo del grado de desecación producido por las condiciones climáticas. Descripciones de procedimientos subaereales en tres minas son mencionados por Skolasinski, et. al. (1990) y Knoght & Haile (1993).

A menudo se colocan drenajes en la parte inferior de los depósitos de relaves como parte de las técnicas subaéreas, y una limitada información de campo indica que ello puede ocasionar la disminución de una presión de poros negativa en porciones de depósitos de relave fino. Las condiciones de no- saturación a través del depósito, sin embargo, pueden ser alcanzadas únicamente mediante una adecuada duración y grado de secado de las capas individuales de relaves durante la deposición, lo cual a su vez depende de las características de la evaporación y los procedimientos operativos en un lugar específico. A menos que se puedan alcanzar condiciones de no- saturación que se mantengan a través de todo el depósito, los depósitos de relaves sub-aéreos pueden permanecer susceptibles a la licuefacción bajo los niveles de movimientos sísmicos que se esperan en el Perú; de modo que para prevenir la licuefacción se requerirán las mismas medidas de diseño consideradas para disposiciones convencionales en superficie. Que se sepa, ningún depósito de relaves que use procedimientos sub-aéreos ha tenido experiencias sísmicas significativas en Sudáfrica u otro lugar.

La disposición subaérea ha sido sugerida para las pequeñas minas de oro a través de la costa peruana y regiones desérticas, en donde la degradación intensa del cianuro junto con la concentración superficial de valores residuales de oro resultan gracias a la migración capilar de los fluidos hacia la superficie de los relaves (Villachica y Sinche, 1986). Sin embargo, es muy posible que se requieran pruebas de campo a gran

escala, por largos períodos, si el secado ha de ser considerado como el principal medio para mejorar la resistencia a la licuefacción y la estabilidad sísmica aquí o en cualquier otro lugar del Perú. Comentarios similares se aplican a los métodos de descarga por espesamiento discutidos más adelante.

#### b) Descarga Espesada

Como lo describió Robinsky (1979), el procedimiento de descarga espesada se basa en la eliminación de mayor cantidad de agua de los lodos de relaves, mediante espesamiento en la concentradora hasta por lo menos 50-60% de sólidos (% peso). Tales lodos pueden alcanzar una inclinación de 3-6 grados cuando son depositados a partir de una tubería. La Figura 4.1 muestra que esta forma de disposición tiene el potencial de reducir la extensión de la construcción de la represa requerida para depósitos superficiales convencionales, con el correspondiente ahorro en costos de construcción de la presa, aunque esto pueda ser contrarestando en alguna medida por el costo de espesamiento y bombeo de los lodos de relave.

Se requiere un lugar amplio y plano para utilizar la deposición mediante descarga espesada, y es por ello inadecuado para las áreas montañosas del Perú. Las operaciones en dos minas que utilizaron este procedimiento han sido descritas por Yeomans (1985) y por Wood & McDonald (1986). Con su superficie cónica inclinada, el método ha sido también propuesto como un medio para incrementar la capacidad de los depósitos superficiales convencionales y para ayudar en la construcción final de las pendientes de los depósitos superficiales que controlan el escurrimiento pluvial después y durante el cierre.

Alcanzar estas inclinaciones, y controlar por lo tanto los relaves depositados, depende de que se alcance una densidad de lodo (% sólidos) lo suficientemente alta para evitar la segregación de partículas por tamaño durante la deposición del cono. Asumiendo que un material uniforme, no segregado, sin zonas de arenas diferentes puede tener características de retención de humedad similares a la de las lamas, como se discutió anteriormente, se ha propuesto que las condiciones saturadas resultantes pueden mitigar el desarrollo del ARD en los relaves de descargas espesadas. En una pequeña prueba experimental de campo de este concepto, Dave, et. al. (1990a) encontró dificultades para mantener el contenido de sólidos de la pulpa tal como se requería para condiciones de no segregación y plena saturación, y la oxidación dentro de los 0.5 m superiores acidificó el resto del depósito en toda su profundidad de 1.75 m. Sin embargo, con una permeabilidad del orden de los  $10^{-4}$  cms/s, algún grado de drenaje por gravedad puede anticiparse aún cuando se hubiera alcanzado las condiciones de no segregación.

Muchos de los problemas operacionales encontrados con los métodos de descarga espesada han resultado de las dificultades en espesar suficientemente los relaves que contienen una fracción significativa de arena. Las condiciones de no segregación requeridas para controlar el flujo de relaves y alcanzar gradientes o inclinaciones razonables del cono son altamente sensitivas a pequeños cambios en la densidad del lodo espesado. Dos minas peruanas que anteriormente usaron este procedimiento realizaron la primera etapa de la eliminación de agua del relave original mediante ciclones y espesando el rebose del mismo en espesadores convencionales. Sin embargo, se ha reportado que la mezcla inadecuada de las arenas del ciclón y de los lodos espesados ha sido responsable del fracaso en alcanzar condiciones de no segregación y del

control de la pendiente del cono. La experiencia operacional en este y otros casos indica que los métodos de descarga espesada necesitan, para ser exitosos, que los relaves finos no contengan una fracción significativa de arena (tal como los relaves de cianuración de oro y plata) o que las arenas sean separadas de la pulpa de relaves y depositadas en otro lugar por un método diferente. En tales casos, los bajos costos de energía de bombeo y de desgaste de tuberías atribuidas a las lamas pueden hacer económicamente posible el considerar lugares de disposición mucho más distantes que son más adecuados para este método (Villachica, 1979).

Al igual que cualquier otro relave saturado, los relaves espesados permanecerán susceptibles a licuefacción sísmica bajo los grados de movimiento sísmico que se esperan en el Perú, a menos que se garantice una completa desaturación del depósito. Por ejemplo, Poulos et. al. (1985) encontró que aceleraciones de la corteza de aproximadamente 0.3 g podían iniciar la licuefacción de relaves de bauxita. Estos materiales tienen un contenido de arcilla excepcionalmente alto de modo que la licuefacción con aceleraciones menores a las reportadas podría ocurrir con las características de relaves de otros minerales que se encuentran en el Perú. Usando métodos originalmente desarrollados por Lucía (1981), Jeyapala (1982) se demostró que los relaves espesados, inicialmente depositados en inclinaciones cónicas de 6 a 8 grados podrían sufrir fallas de flujo debido a licuefacción sísmica, con inclinaciones posteriores a la falla de 0.5 a 2.0 grados. Aunque estos efectos de licuefacción pueden ser mitigados por la construcción de diques para contener el depósito, el costo de ello puede superar largamente la principal ventaja del método.

Excepto en circunstancias especiales, la disposición mediante descarga espesada ofrece en el mejor de los casos ventajas limitadas, principalmente el potencial para reducir los costos de relleno del dique de contención y aún estos beneficios dependerán de las circunstancias específicas de cada lugar. En la medida en que los problemas que involucran la estabilidad física y química de los relaves espesados no son sustancialmente diferentes de aquellos con técnicas de disposición más convencionales, las limitaciones e incertidumbre asociadas con aquel método pueden superar las ventajas potenciales para muchos casos en el Perú.

### c) Relaves Deshidratados

Es posible eliminar agua de la pulpa de relaves en la concentradora utilizando equipos tales como: filtros de vacío, de presión, filtros de tambor, filtros de faja y/o centrífugas. El contenido de agua de los relaves puede ser reducido lo suficiente como para permitir su transporte y ubicación por camiones o fajas transportadoras, usualmente hasta 20-25% por peso (para gravedad específica del mineral cercano a 2.8). Debido a que los relaves aún contienen humedad significativa, la terminología de relaves «secos» que algunas veces se aplica al método no es estrictamente correcta.

Aunque los costos de capital y operación del equipo pueden ser altos y las limitaciones en confiabilidad requieren un sistema de disposición de relaves de respaldo, el método ofrece ventajas únicas para las minas ubicadas en los valles estrechos y montañas empinadas del Perú. Adicionalmente, las operaciones de oro pueden lograr un incremento en la recuperación de la solución y con ello incrementar la extracción de oro y reducir al mismo tiempo y en forma significativa la contaminación por cianuro. Las pérdidas de agua por evaporación que de otra manera ocurren a partir de los depósitos convencionales, pueden ser reducidos en climas extremadamente áridos u en otros casos donde la disponibilidad de agua para la concentradora es limitada. En efecto, la infiltración y evaporación bajo condiciones operativas es reducida sustancialmente o eliminada porque sin deposición hidráulica no habrá agua de decantación embalsada en la superficie del depósito. El agua recuperada de los filtros es fácilmente recirculada al proceso de concentración o

cianuración, eliminando la necesidad de descargas directas del agua de proceso aún en áreas húmedas que tienen un balance desfavorable de agua debido a las precipitaciones pluviales.

Los procedimientos de manipuleo y apilamiento ejercen una influencia de control de la estabilidad física de los depósitos de relaves deshidratados. Puede ocurrir la total saturación en las zonas de mayor profundidad debido a la compresión de los relaves o a la infiltración, y esto a su vez ocasiona susceptibilidad frente a la licuefacción sísmica. De otro lado, el secado por aire puede reducir el contenido de agua aún más hasta un 5-15%. Mientras esto puede producir condiciones ideales para la descarga final de relaves en pilas altas (muy semejantes a los echaderos de desmonte en la construcción de una mina) también hace que el material sea extremadamente suelto. Si es que los relaves se saturan por infiltración u otros medios, pueden producirse grandes deslizamientos aún en ausencia de movimiento sísmico. Este mecanismo, denominado «licuefacción estática o espontánea», ha sido explicado por Eckersley (1990), y descrito en depósitos finales de cenizas y relaves de caolín por Bishop (1973).

Estos problemas, sin embargo, pueden ser tratados apropiadamente si se colocan los relaves deshidratados en pilas horizontales y se compactan mecánicamente para incrementar su densidad «in-situ». Si esto se hace correctamente, la compactación (como será discutido más adelante en el Capítulo V del punto 4.b) puede garantizar la estabilidad física de los relaves bajo todas las condiciones, sísmica, hidrológica o de otra manera eliminando virtualmente el riesgo potencial de fallas por deslizamiento. Esto hace que la eliminación de agua sea una técnica con potencial significativo, donde la economía y las condiciones de operación lo permitan. Los relaves deshidratados, debidamente compactados, pueden solucionar muchos de los problemas de disposición de relaves en el Perú causados por terrenos muy inclinados, por clima húmedo, o por ambos, y el método podría adaptarse muy bien para las minas más pequeñas. Estos relaves pueden ser colocados en las laderas de los valles, antes que a través de ellos, minimizando los problemas de inundaciones y proporcionando probablemente el máximo grado de estabilidad física a largo plazo, que pueda ser alcanzado. En casos que involucran el ARD, los depósitos de relaves desecados y compactados pueden también resolver algunas de las dificultades encontradas al construir coberturas secas post-clausura (ver Cap.VI). Por muchas razones, la disposición de relaves deshidratados debe ser considerado seriamente para el beneficio de muchas minas en el Perú.

## 2. Relleno Subterráneo

Es posible retornar prácticamente la mitad y hasta dos tercios de los relaves producidos hacia las labores explotadas en las minas subterráneas. (Resulta poco probable, sin embargo, integrar este procedimiento con las operaciones de las minas de tajo abierto). El relleno, como se denomina a este procedimiento, es parte esencial de algunas operaciones subterráneas de extracción de mineral como el procedimiento de «corte y relleno», y puede también ser utilizado para incrementar la recuperación y extracción de mineral mediante el reemplazo de los pilares de sostenimiento en las operaciones subterráneas del tipo de «cámaras y pilares». La tecnología de «relleno» es descrita ampliamente en la literatura de ingeniería de minas por lo que no se resume aquí.

En las operaciones de relleno los relaves son usualmente retornados al frente de trabajo en forma de pulpa, aunque algunos otros métodos, como el neumático, también son usados algunas veces. El relleno no cementado requiere una forma de relave permeable y de drenaje libre, de tal manera que el cicloneo (ver Capítulo II) es utilizado en la concentradora para separar y retornar la fracción de arena al frente de trabajo dejando las lamas para disposición superficial. El relleno cementado utilizando cemento Portland u otros aditivos puede producir un relleno durable en superficies de trabajo en la mina o incrementar la rigidez del relleno para un mejor soporte de la roca. Algunas veces, se usan relaves no cicloneados y en este caso parte de los relaves permanecen sin separarse, para su disposición superficial.

Al reducirse la cantidad de relaves requeridos para la disposición superficial, el relleno puede reducir la magnitud del impacto de los relaves superficiales y también hace posible aprovechar

lugares más pequeños para la disposición de los relaves remanentes. Para relaves que tienen un severo potencial de ARD, el sellado de las labores mineras rellenas para prevenir el ingreso de oxígeno y/o la eventual inundación intencional posterior al minado, pueden efectiva y permanentemente prevenir la generación de ARD a partir del relleno de relaves. Aún mayores beneficios relacionados con el ARD son posibles si el cicloneado de relleno de arena origina la descarga exclusiva de lamas a la superficie, cuyas características de retención de agua pueden reducir sustancialmente y por mucho tiempo la oxidación potencial. Sin embargo, a menos que se disponga de significativos volúmenes de labores minadas, el relleno y por lo tanto el cicloneo sólo pueden ser conducidos en forma intermitente, resultando en descargas superficiales que se alternan entre lamas y relaves globales que incrementan la fracción de arena y cuyo drenaje relacionado con ARD, retención de humedad, y sus características de oxidación en el embalse superficial son menos favorables. El uso de relleno específicamente como una medida de control de ARD se discute en el Capítulo VI.

En vista de la prevalencia de cuerpos mineralizados subterráneos de alto contenido de sulfuros en el Perú, el relleno ofrece uno de los medios más prometedores y de costo efectivo para reducir las dificultades asociadas con la disponibilidad y adaptabilidad de los lugares para la disposición de relaves en superficie. Debido a que el relleno es parte integral de la operación minera, debe ser planeado con anterioridad como parte del método de minado. Tradicionalmente, los materiales y procedimientos para relleno han sido diseñados exclusivamente para ajustarse a las necesidades de la minería subterránea, sin considerar los problemas de disposición de relaves como tales. La optimización del minado y de la disposición de relaves en forma integral pueden hacer del relleno una operación de mucho mayor valor dentro de la operación global.

### 3. Disposición Submarina de Relaves

La disposición submarina se refiere a la descarga de relaves al océano a través de un punto de descarga debidamente diseñado a una profundidad y ubicación seleccionadas para minimizar los impactos ambientales, tales como turbidez y su efecto sobre los peces. Poling & Ellis (1993) diferencian claramente este procedimiento de la simple descarga de relaves a los ríos o a las playas del océano, los cuales, indicaron, causan impactos severos totalmente inaceptables.

La tecnología para la disposición de relaves submarinos se ha desarrollado a base de operaciones intensivamente monitoreadas y llevadas a cabo en un pequeño número de minas en los fiordos costeros del oeste de Canadá, principalmente en la Isla Copper («Copper Island») y en la mina de molibdeno de Kitsault. Las experiencias en la Isla Copper son representativas.

Por más de 20 años las concentradoras de la Isla Copper han descargado relaves en la Bahía de Rupert y ahora ellos ocupan el área que se muestra en la Figura 3.2 con profundidades de hasta 50 mts. sobre el fondo del fiordo de ingreso. El monitoreo oceanográfico, batimétrico, químico y biológico ha mostrado que los relaves floculan y se asientan rápidamente bajo la influencia combinada de los aditivos de la concentradora y el pH ligeramente alcalino del agua de mar, con algunos episodios ocasionales de suspensión de relaves y turbidez en la columna de agua. Esto es logrado por una deaeración y dilución en agua de mar de los lodos de relaves en una cámara de mezcla previa a la descarga; el punto de descarga se ubica a una profundidad de 50 m. por debajo de la zona de producción biológica primaria en la columna de agua. No ha habido indicación de toxicidad por relaves o bioacumulación de metales en los organismos marinos. El más importante y más significativo de los impactos parece ser la sofocación de organismos bénticos inmóviles, ocasionado por los relaves, pero la recolonización y recuperación de las poblaciones bénticas en la superficie de los relaves parecen ocurrir luego de un año o dos, después de que la deposición termina, de tal manera que los principales efectos ambientales son bastante recuperables tal como hasta ahora se han indicado (Poling & Ellis, 1993).

Basados en estas experiencias, Baer, et. al. (1992), han propuesto varios criterios, delineando condiciones favorables para una disposición submarina ambientalmente aceptable. En adición

a lo obvio, que la mina esté razonablemente ubicada cerca del mar otros requerimientos técnicos incluyen:

Un bajo porcentaje de mineral sulfurado y ausencia de metales tóxicos solubles, de reactivos de concentradora, y de productos secundarios de la concentradora en los relaves (condiciones más fácilmente satisfechas por minerales porfiríticos). El espesamiento de la pulpa de relaves en la concentradora, la deaereación de los relaves, y su mezcla con agua de mar de tal manera que la densidad de los lodos de relaves no sea menor que la densidad del agua de mar en la profundidad. Ubicación biológica y oceanográfica adecuada del punto de descarga, en un ambiente deposicional que sea relativamente estable con respecto a las corrientes, tal como el fondo de un fiordo.

La mayor ventaja potencial de la disposición submarina de relaves es la posibilidad de eliminar la generación del ARD de los relaves mediante la submergencia, mientras que al mismo tiempo se evita la licuefacción sísmica, el desbordamiento hidrológico y los riesgos de estabilidad relacionados a los depósitos o embalses superficiales. Pero algunos problemas permanecen pendientes de solución. Aunque los estudios por Pedersen et. al (1990) indican que no habían signos de oxidación en relaves con alto contenido de sulfuros depositados en un lago de agua fresca, los relaves submarinos altamente sulfurados de la mina Black Angel en Groenlandia han reportado la bioacumulación de metales por organismos marinos, y por ello se requiere estudios posteriores de los problemas que presentan los relaves altamente sulfurados. Adicionalmente, los efectos de terremotos y tsunamis en la estabilidad a largo plazo de los relaves submarinos no ha recibido aún una investigación extensa. Los requisitos para el monitoreo sofisticado de la disposición submarina de relaves durante las fases de pre-minado y a través de períodos operacionales y de clausura son rigurosos e intensivos y deben ser llevado a cabo como una parte integral de cualquier operación.

En el Perú la corriente marina que se dirige hacia el norte, conocida como la corriente de Humboldt, ha tenido marcada influencia sobre los relaves que han sido descargados a los ríos desde las minas en los Andes y sobre los materiales depositados en los deltas de los ambientes costeros marinos. Los márgenes norteños de estos deltas muestran una acumulación preferencial de sulfuros y minerales pesados debido a la fuerte acción de las corrientes en las aguas poco profundas (Villachica, 1982; Villachica y Sinche, 1986). El planeamiento, diseño y monitoreo de la descarga submarina de relaves debe tomar en cuenta la acción de la corriente de Humboldt en el sur del Perú, y de la corriente El Niño que fluye hacia el sur en el norte del Perú. La costa peruana ofrece por otro lado, áreas planas y desérticas que ofrecen mejores alternativas que la deposición submarina.

La disposición de relaves en las aguas frescas de los lagos naturales es similar en algunos aspectos a la disposición submarina de relaves, excepto en que pueden producir pequeños lagos biológicamente estériles. La disposición de relaves en lagos ha sido practicada, por ejemplo, en Canadá y Finlandia. Su principal ventaja es que tiene el potencial para eliminar completa y permanentemente la generación del ARD sin ninguno de los riesgos de estabilidad asociados a los diques de relaves. Al igual que la disposición submarina, sin embargo, la disposición incontrolada de relaves en lagos naturales sin adecuado conocimiento de los sitios o de los relaves y sin un monitoreo biológico y químico, no es una práctica aceptable. Por ejemplo, en una mina en el Perú un pequeño dique ha sido utilizado para aumentar la capacidad de un lago natural, pero no lo suficiente como para prevenir las fluctuaciones estacionales del nivel de agua, de lo cual se desprende que los relaves estaban expuestos y se produjo la oxidación. Al mismo tiempo, la inadecuada capacidad del vertedero de la represa, asegura que eventualmente ésta fallará debido al efecto de inundaciones que la sobrepasarán, dispersando entonces, los relaves generadores de ácido y constituyéndose en un peligro de inundación sobre grandes áreas, aguas abajo. Esta condición ilustra cómo el planeamiento inadecuado no puede alcanzar los beneficios potenciales de un método, al mismo tiempo que da realismo a los potenciales riesgos de otros.

#### 4. Métodos Combinados de Disposición

El método para la disposición de relaves, es tradicionalmente seleccionado durante la etapa de estudio de factibilidad de la mina, usualmente, sin un detallado entendimiento de las características de los relaves o conocimiento del lugar en perspectiva para disponerlos. Rara vez se considera más de un método de disposición, con el fin de evitar complejidades y simplificar el planeamiento.

Mientras que tales procedimientos continuarán siendo útil para algunas operaciones grandes de tajo abierto, para resolver los problemas de disposición que enfrentan las minas subterráneas en áreas restringidas en el Perú se requerirá cada vez más, que varios de los métodos de disposición discutidos en este capítulo, sean combinados en forma innovativa y que se haga del planeamiento de mina, y el diseño del proceso, y del planeamiento de los relaves, un proyecto integral, reconociendo que la solución óptima en una de las áreas, no es necesariamente la solución óptima para el proyecto en su totalidad.

Por ejemplo, el relleno subterráneo usando relaves globales cementados puede ser complementado con instalaciones de eliminación del agua de los relaves para el material remanente, lo cual es practicado actualmente por una mina del Perú con notable éxito. Alternativamente, las arenas cicloneadas pueden ser retornadas al subsuelo como relleno mientras que las lamas remanentes son bombeados a distancias mucho mayores pero al mismo tiempo, a lugares más convenientes. Como será discutido en el Capítulo 7, problemas del ARD asociados con relaves altos en sulfuros, originan combinaciones novedosas y es razonable imaginar que una mina pueda usar disposición submarina para las arenas cicloneadas a fin de incrementar la sedimentación bajo el agua, mientras que reserva las lamas que retienen humedad para disponerlos en superficie junto con otras medidas de mitigación del ARD. O, la pirita puede ser extraída de los relaves por flotación y retornada al subsuelo como relleno, dejando los sólidos más benignos para ser dispuestos en superficie.

Mientras que muchas de tales combinaciones pueden ser visualizadas, el objetivo no es intentar identificar cada uno de los, sino más bien enfatizar que los grandes problemas de relaves tienen la mayor posibilidad de ocurrir en las minas más pequeñas del Perú, y que la solución a estos problemas es posible a través de un profundo entendimiento de los problemas y métodos de disposición de relaves, con la combinación innovadora de estos métodos que van más allá de los procesos tradicionales de diseño y planificación, y con un enfoque integrado que evita

optimizar un aspecto de la operación a expensas de otro. Para ser efectivas, estas soluciones deben ser primero concebidas apropiadamente y la adecuada información obtenida, desde el inicio de los estudios de factibilidad de la mina, con un desarrollo y refinamiento continuo a través del diseño y operación de la misma.

## LOCALIZACION Y DISEÑO

### Capítulo IV. LOCALIZACION Y DISEÑO DE DEPOSITOS SUPERFICIALES

Convencionalmente, los embalses en superficie han sido métodos elegidos en la industria minera para el manejo de relaves debido a factores económicos y a la costumbre. Los capítulos anteriores han dejado en claro que las condiciones peruanas requieren una evaluación cuidadosa de los métodos alternativos de disposición de relaves, pero, el represamiento en superficie parece que continuará jugando un rol importante, sino principal, para la mayoría de las minas existentes y nuevas en el país.

Asegurar la integridad de las presas o depósitos de relaves, es la piedra fundamental para alcanzar la estabilidad tanto física como química en el manejo de relaves. Convencionalmente, ésto solo es cuestión de aplicar principios muy bien fundamentados y reconocidos de ingeniería de diseño. Pero en el Perú esto puede ser excepcionalmente difícil debido a la severidad y extremos en la topografía, clima y los riesgos naturales que se encuentran en el país. Mucho mayor énfasis debe darse a la elección inicial del lugar y al esquema del embalse; puede ser técnica y económicamente imposible corregir más tarde errores iniciales en la elección del lugar, lo cual puede continuar amenazando la integridad del embalse a través de la operación y por mucho tiempo después de su clausura. El diseño y selección adecuados del lugar para

ubicar un embalse de relaves, no puede estar garantizado sin una evaluación profunda de los factores geológicos, geotécnicos, hidrológicos y geoquímicos efectuada por especialistas en estos campos.

Para propósitos de este capítulo, se asume que los relaves son descargados hidráulicamente como una pulpa, de acuerdo a las prácticas convencionales descritas en el Capítulo I. Lo que hay que determinar es entonces el esquema, la configuración y la ubicación más conveniente para la presa. La siguiente información es la mínima requerida para resolver este punto, para cada alternativa de ubicación de embalse:

Mapeo topográfico preciso del lugar de embalse (con intervalos de contornos no mayores a un metro) y de la totalidad de la cuenca del drenaje tributario.

Acceso a la información sobre la propiedad y aspectos legales.

Ubicación del cuerpo mineralizado, ubicación de los botaderos, ubicación de la concentradora, y perforaciones por debajo de los lugares proyectados para el embalse.

El tonelaje de relaves a ser producidos por la concentradora durante la vida completa de la mina.

La clasificación por tamaño y la gravedad específica de los relaves.

Características químicas de los relaves y de los efluentes de la concentradora (pruebas de envenenamiento).

Potencial ARD de los relaves (Pruebas ABA1).

Media anual de precipitación y evaporación, y estimados de valores extremos de precipitación.

Información geológica e interpretaciones de las condiciones de la roca y suelos a partir de estudios aero-fotográficos, reconocimientos del terreno y excavaciones de prueba.

Toda esta información es necesaria antes que la selección del lugar y las decisiones de diseño sean terminadas y documentadas para un nivel adecuado de estudios de impacto ambiental o similares. En realidad, la información será generada a través del proceso de planeamiento, y las preferencias iniciales acerca de la ubicación del embalse de relaves, se establecen a menudo en los primeros momentos de la evaluación de la factibilidad económica de la mina, o sea cuando poca o ninguna de la información ha sido aún obtenida o evaluada. Cuando se presentan los problemas de ubicación, a menudo es debido a que las decisiones sobre la ubicación y el presupuesto de capital para el proyecto han sido obtenidos demasiado pronto, sin contar con información adecuada que permita considerar las alternativas de ubicación, diseño, o métodos de disposición y aún cuando la misma información en desarrollo indica la necesidad de hacerlo así.

La ubicación y el diseño deben, por lo tanto, ser procesos iterativos que comienzan con criterios muy generales, basados en configuraciones y consideraciones que son refinados o revisados drásticamente conforme la información es generada y el proceso avanza. Idealmente, por lo menos tres o más ubicaciones para el embalse de relaves deben evaluarse simultáneamente y al mismo nivel de detalle, hasta que la información sobre todos los factores relevantes sea adecuada y suficiente para demostrar la superioridad de un lugar sobre los otros y para documentar en su totalidad las razones para esta preferencia.

## 1. Factores Técnicos

Posteriormente se describen varias categorías de factores técnicos y su influencia sobre la ubicación y el diseño del embalse. Estas se enumeran en el orden en el cual son usualmente consideradas, sin que ello refleje, necesariamente, su importancia relativa.

### a) Características de la Mina y de la Concentradora

La ubicación de los depósitos de relaves tan cerca como sea posible de la concentradora (usualmente dentro de 5 a 10 kms) y por debajo de ella en elevación, minimiza los costos de la tubería de relaves y de retorno del agua y también los costos de bombeo. Desde un punto de vista ambiental, puede ser mejor localizar los impactos mineros dentro de la misma área, y las tuberías de relaves más cortas reducen el riesgo de derrames por rotura de tubería. En terreno

extremadamente accidentado, sin embargo, las distancias hasta lugares planos convenientes pueden ser de más de 30 kms. Los instrumentos de la concentradora sensibles a la presión se emplean para cerrar automáticamente las tuberías de relaves en la eventualidad de rupturas, con zanjas y diques construidos para contener los derrames a lo largo del alineamiento de la tubería.

Dentro del área de ubicación, la adquisición de la propiedad y las limitaciones al acceso legal, deben ser resueltos, pero estas consideraciones no deben ser factores excluyentes en los pasos iniciales de la evaluación. El embalse no puede ser construido sobre un cuerpo mineralizado actualmente reconocido o con futuro potencial, y la perforación de descarte es requerida para evitar esta posibilidad. Sería deseable ubicar el embalse cerca de los botaderos de la mina si otros materiales para la construcción de la represa de relaves no están disponibles o escasean. Varias minas subterráneas en el Perú, tienen sus depósitos de relave a menos de 0.5 km. de la planta y/o la mina.

#### b) Capacidad en Volumen

Las ubicaciones identificadas individualmente o en conjunto, deben tener suficiente capacidad para suministrar almacenaje a los relaves a lo largo de toda la vida de la mina, teniendo en mente criterios económicos y prácticos relacionados al relleno de la presa, a la desviación del agua superficial y al recubrimiento del embalse si es que esto fuera necesario. Este criterio es más difícil de satisfacer en terrenos de inclinación pronunciada. Por razones prácticas, económicas y de construcción, las alturas de las represas deben limitarse a aproximadamente 70 a 100 mts. Y el incremento anual en la elevación del dique, deben ser de 5 a 10 mts. En otros casos, podrán requerir varios embalses por separado. Cuando se requiera un recubrimiento del embalse para el control de infiltraciones, ninguna parte de los taludes del embalse deberá ser más inclinada que 3H:1V2 .

La optimización económica de la configuración de un embalse con recubrimiento es importante, y represas más altas se justifican económicamente pues reducen el área del embalse, y por lo tanto el costo de los recubrimientos.

#### c) Hidrología

De todos los factores que influyen la estabilidad física de un embalse durante el período de post-clausura, la hidrología es probablemente el más importante. Aún durante la operación, el desborde por inundaciones ha causado cerca del 20% de todas las fallas documentadas en las represas de relaves (USCOLD, 1994). En el Perú, los riesgos de desborde hidrológico son aparentemente más severos que en cualquier otro lugar debido a las condiciones climáticas extremas combinadas con la ausencia de amplia información hidrológica. Esto implica definitivamente que la localización para minimizar las corrientes de aguas superficiales deberá ser enfatizada contra la dependencia basada en aspectos de ingeniería tales como derivaciones y canales de desagüe, teniendo en cuenta de manera especial las condiciones de post-clausura. Estas recomendaciones son aún más importantes para las minas ubicadas en los Andes y la Selva Alta.

La localización para minimizar la afluencia de aguas superficiales y de lluvias al embalse también influencia la necesidad de descargar agua del embalse, y por lo tanto afecta la extensión del tratamiento de agua si la naturaleza química del efluente de la concentradora lo amerita. La necesidad de descargar agua se determina por los flujos calculados en un balance de agua según su afluencia menos la combinación de salidas de líquido y la capacidad de almacenamiento. El almacenamiento se debe principalmente al agua contenida en los espacios vacíos que existen en los relaves depositados, mientras que los flujos de salida incluyen la evaporación, retorno del agua a la concentradora, e infiltración. Los flujos de entrada se obtienen del agua presente en la pulpa del relave y de las corrientes superficiales. Aún cuando se disponga de información

confiable, el balance de agua para cualquier año puede desviarse notablemente de los valores calculados en base a condiciones promedio, debido a variables de operación, variaciones climáticas, y dificultad en factores estimativos tales como infiltración, deshielos, y áreas de las pozas de evaporación de agua. Además de las consideraciones de estabilidad física, la localización para minimizar la afluencia de aguas superficiales es de interés económico para la operación de la mina pues elimina la necesidad de descargas del embalse y del tratamiento de aguas, o en todo caso reduce la capacidad de tratamiento si este fuera necesario.

La minimización de flujos de entrada se puede lograr con sólo localizar el embalse lo más cerca posible, a la línea de cumbre del valle considerado, minimizando, de este modo el área de captación de las aguas de escorrentía que drenan sobre el embalse, tal como es ilustrado en la Figura 4.1. Como regla empírica se debe tratar que la relación del área total de captación al área superficial del embalse sea menor de 3 en todo momento, y en ningún caso mayor a 5. El embalse no deberá ser nunca construido a través de un arroyo permanente, o en una quebrada seca afectada por huaycos, como se explica más adelante.

#### d) Factores Geológicos

Los peligros geológicos adquieren mayor importancia en los depósitos de relaves localizados en el Perú que en los ubicados en la mayoría de los demás países. Los Andes peruanos se encuentran entre las montañas más jóvenes del mundo, continúan su crecimiento aún hoy día, y los procesos de desplazamiento de masas de todo tipo ocurren a un ritmo geológico rápido. La Geomorfología en el Perú no es tanto un asunto de características antiguas sino que representa procesos activos y en acción permanente.

Las características geológicas del lugar afectan la estabilidad física del embalse y la movilidad de los contaminantes potenciales y dentro de las aguas subterráneas. Algunas condiciones geológicas adversas pueden ser mitigadas con un diseño de ingeniería apropiado (a veces costosos) si es que éstos no son muy severos, pero hay otros donde es mejor evitarlos, trasladándose a lugares alternativos. Como mínimo se requiere un análisis detallado por medio de aerofotografía estereográfica, reconocimiento en el terreno y por lo menos unas pocas excavaciones de prueba para proporcionar información relacionada con la ubicación. La profundidad, dirección del flujo, gradientes, y usos actuales de las aguas subterráneas, son también evaluados como parte de los estudios ambientales básicos, pero si no fuera así, habrá que realizar perforaciones para completar los estudios de ubicación.

Las condiciones del suelo y de la roca, que pueden afectar en forma negativa a la estabilidad física, necesitan ser identificadas junto con la extensión y profundidad de cualquiera de esos depósitos. Esto incluye depósitos susceptibles a la licuefacción como los de arenas, limos o gravas, que están saturados o podrían estarlo bajo la influencia de la infiltración del embalse; la turba (hallada en el Perú en sus terrenos andinos glaciales), y las arcillas saturadas independientemente de su rigidez. Las características del diseño de la presa para resolver los problemas de estabilidad originados por estos materiales, incluyendo la excavación y remoción, pueden tener una influencia importante sobre las decisiones de ubicación, y más tarde, en los costos de manejo del relave si es que no son identificados durante la etapa de selección del lugar. Comentarios similares se aplican a los suelos sensibles a la humedad, en las regiones áridas y semi-áridas que son susceptibles de colapsar cuando se saturan. Los sitios asentados sobre suelo o roca que contienen extensos depósitos de material soluble como el yeso, así como aquellos que están ubicados sobre calizas solubles deben evitarse de todos modos.

Otros riesgos geológicos incluyen las avalanchas y deslizamientos. Los deslizamientos activos o las características periglaciales relacionadas, son a menudo identificadas durante el

reconocimiento geológico y deben ser evitadas, sea por debajo o por encima del embalse. El potencial para grandes avalanchas de roca puede ser indicado a veces por evidencia geológica de ocurrencias pasadas y derivadas de la evaluación del terreno. Los cauces de las avalanchas de nieve son generalmente obvios; ellos tienen un pequeño efecto sobre la estabilidad de embalse como tal, pero pueden significar una molestia importante para la operación y el acceso al depósito.

Uno de los riesgos más comunes y serios desde el punto de vista geológico, especialmente en la costa y sierra del Perú, son los derrumbes de material de rápido desplazamiento o flujos de lodo llamados huaycos, que ocurren en quebradas. Entre 1925 y 1982 hubieron 4,300 huaycos registrados, 10 veces más que las inundaciones, deslizamientos de tierra y avalanchas, combinadas (ONERN, 1986), haciendo de ellos el riesgo natural posiblemente más serio del Perú, además de los terremotos. Marticorena (1991) describe varios huaycos destructivos recientes, incluyendo uno en 1981 que embalsó el Río Rímac en el punto denominado Verrugas, al Este de Lima. No muy lejos de allí, un huayco en 1983 destruyó dos pequeños represamientos o embalses de relaves que habían sido construidos a través de una quebrada. Las áreas susceptibles a los huaycos pueden ser identificadas por la naturaleza distintivamente estratificada de los depósitos de huaycos expuestos o mediante pozos de prueba abiertos en la zona. Tales exposiciones sugieren que en muchas quebradas, los huaycos pueden ser más frecuentes que las inundaciones, con materiales generados a grandes mayores elevaciones por escorrentías que nunca alcanzan el fondo de la quebrada agua.

No hay diseño práctico de ingeniería que pueda ser considerado para proteger los embalses de relaves contra los efectos de «huaycos», por lo cual las áreas potencialmente afectadas deben ser identificadas durante los estudios de ubicación del depósito, y evitadas. Las experiencias en el Perú debidamente documentadas muestran que los deslizamientos de tierras que embalsan la parte alta de las áreas de drenaje por medio de «huaycos» u otros tipos de deslizamientos pueden también amenazar los embalses a través de las brechas abiertas por las olas de inundación, especialmente durante el período posterior a la clausura.

## 2. Diseño de los Depósitos

### a) Desarrollo de Celda Simple y Múltiple

Para un sitio determinado, es posible desarrollar el embalse de dos modos y a medida que se lleva a cabo la deposición del relave. La totalidad del lugar puede ser utilizada desde el comienzo (generalmente, mientras se va levantando el dique y conforme el embalse crece en altura, como se discutirá en los siguientes capítulos), o puede iniciarse utilizando porciones más pequeñas del lugar, y luego expandiéndola lateralmente mediante la construcción de nuevos segmentos o celdas de embalse, a medida que las primeras quedan colmadas de relaves. Los embalses múltiples, ya sea en el mismo o en diferentes ubicaciones, pueden considerarse como la única opción factible para la accidentada topografía peruana.

El desarrollo secuencial de las celdas múltiples requiere finalmente más material de relleno y el costo total para la construcción del dique resulta mayor, pero esto se contraresta con muchos beneficios económicos y ambientales. Económicamente, porciones importantes de los costos de construcción del embalse se difieren y distribuyen a lo largo de la vida del proyecto, y si se toma en cuenta el valor actual neto habrá muy poca o ninguna penalidad económica por el costo de la construcción adicional que requiere la represa. Igualmente importante es la reducción del costo de capital inicial de tal manera que la mayor parte del costo del embalse pueda ser financiado por operaciones de flujo de caja en oposición a préstamos o financiamiento interno. Estas consideraciones son particularmente significativas cuando los embalses requieren recubrirse con forros, lo cual puede hacer que el manejo de relaves requiera una porción sustancial del costo total del proyecto. Parish (1990) mediante el análisis financiero de varios escenarios de desarrollo minero mostró con referencia a todos los costos ambientales, que las

utilidades del proyecto dependían fundamentalmente del costo inicial de construcción de las facilidades requeridas. El desarrollo de embalses de celdas múltiples pueden ser entonces una forma efectiva de reducir este componente.

Desde un punto de vista ambiental, las celdas múltiples reducen la infiltración al disminuir el área de agua empozada en cualquier momento, y ello también reduce las pérdidas de agua por evaporación en los climas secos. La rehabilitación del terreno puede ser, por otro lado, realizada por etapas, comenzando con las celdas llenadas al comienzo de la vida del proyecto, y ofreciendo por lo tanto la oportunidad para pruebas, monitoreo, modificaciones y para demostrar la factibilidad de aspectos de la rehabilitación tales como revegetación o control del ARD antes de que se produzca la implementación a toda escala que requiere el período de clausura. Esta restauración por etapas reduce también el área afectada por los relaves en cualquier momento del proyecto. Durante la operación el monitoreo del desarrollo ambiental puede ser utilizado para indicar la necesidad de modificaciones en la operación o en el diseño de las celdas futuras; por ejemplo, el monitoreo de las aguas subterráneas de la celda inicial puede servir para evaluar la necesidad de recubrimientos internos de las subsiguientes celdas o para calibrar modelos numéricos de transporte de contaminante en una forma más exacta que cualquier análisis predictivo por sí solo.

#### b) Configuraciones de los Embalses

Varios esquemas de configuración pueden usarse, dependiendo de los aspectos topográficos e hidrológicos del lugar. La Figura 4.2 muestra la configuración de «dique en anillo» tanto en su forma de celda única como múltiple. Esto se usa en terrenos planos donde las depresiones topográficas

para minimizar el relleno del dique o no están disponibles o son deficientes. Las configuraciones «a través del valle» maximizan los volúmenes de almacenamiento en cañones estrechos, pero tal como se indica en la Figura 4.3 ellos son apropiados únicamente en o cerca de la cabeza del valle, donde los flujos de entrada pueden ser minimizados. Las configuraciones de «laderas de cerros» son adecuadas para laderas rocosas de pendientes suave como se muestra en la Figura 4.4. Las configuraciones de «fondo del valle» pueden ser usadas en pisos de valles aluviales, asumiendo que no existen suelos susceptibles a la licuefacción en el basamento de ellos. El cauce del arroyo se desvía alrededor del embalse como se muestra en la Figura 4.5. Las rocas tomadas de los depósitos de desmontes de minas a tajo abierto pueden ser útiles para proteger las laderas de los diques de contención contra inundaciones extremas, pero es mejor tener especial cuidado para que el agua de inundación no pueda ingresar por el lado abierto en la parte más alta del embalse.

Estas configuraciones de embalses pueden utilizar una variedad de materiales y procedimientos para el diseño y construcción de las represas utilizadas para confinarlos. Los factores relacionados con la estabilidad de la presa de relaves son el tópico del siguiente capítulo.

## ESTABILIDAD

### Capítulo V. ESTABILIDAD DE LAS PRESAS DE RELAVES

La estabilidad física de los depósitos de relaves tanto durante la época de operación como en el período de clausura están determinados por la estabilidad de las presas y las estructuras relacionadas a ella que se usan para retener la pulpa de los relaves descargados. Este capítulo explora los factores relacionados a la estabilidad de la presa de relaves en cuanto conciernen a las condiciones del Perú. Los procedimientos analíticos detallados son discutidos en otras partes (Vick, 1990).

El punto central para comprender los problemas de estabilidad es la apreciación de los tipos de presas de relaves y como éstas han actuado en el pasado.

## 1. Tipos de Presas de Relaves

En algunas circunstancias puede ser conveniente construir presas de relaves inicialmente en toda su altura. Este puede ser el caso, por ejemplo, para embalses recubiertos interiormente o para arreglos de celdas múltiples previamente discutidos en el Capítulo IV. Otras situaciones pueden requerir que el agua esté en contacto directo con la cara interna de la presa, tal como ocurre cuando las aguas de inundación o el deshielo estacional deben ser almacenados en el embalse, cuando toda una playa de relaves no puede ser alimentada por grifos; o cuando una cobertura de agua se mantiene sobre los relaves para controlar la oxidación y el ARD. Tales presas que no se elevan se conocen como presas de relaves del «tipo de retención de agua». Aún con tan solo un metro de agua estancada en contacto directo con la cara «aguas arriba» de la presa, los relaves en el embalse pueden tener poca influencia sobre las características de la infiltración interna de la estructura (Marr, 1983), requiriendo las mismas características y métodos de diseño que las presas convencionales que retienen únicamente agua.

Sin embargo, con anterioridad se explicó la importancia económica para la operación minera de distribuir los costos del manejo de relaves a través de la vida del proyecto, y se ilustró el valor que tenían a este respecto las celdas de embalse múltiple. Por razones similares, las presas de relaves son usualmente levantadas progresivamente de acuerdo con el incremento en altura de los relaves en el embalse. Las presas de relaves elevadas son de los tres tipos básicos mostradas en la Figura 5.1. Todos ellos comienzan con un dique de arranque construido de tierra o de relleno rocoso y luego son llenados con los relaves descargados, pero sólo hasta allí llegan las semejanzas. El desarrollo de estos tipos de diques revisados inicialmente en la Introducción se explican aquí con mayor detalle.

En el caso de las presas del «tipo aguas arriba» mostrado en la Figura 5.1(a), la presa es levantada por la construcción progresiva de «diques perimétricos» sobre la superficie de la acumulación de relaves precedente, de tal manera que cada dique avance sucesivamente hacia el interior conforme la presa es levantada. La característica de este método es que la integridad estructural de la presa está gobernada por las propiedades y comportamiento de los relaves descargados hidráulicamente los cuales forman la base del talud de la presa.

Las presas de relaves del «tipo aguas abajo», ilustradas en la Figura 5.1(b), son levantadas colocando material adicional de relleno en el talud «aguas abajo», o exterior del levantamiento previo. El relleno de la presa, que puede consistir de material de varios tipos, no tiene como basamento relaves depositados hidráulicamente, y las propiedades de estos materiales de relleno pueden ser especificados y controlados para asegurar que sus características sean las adecuadas. Al final, el método «aguas abajo» alcanza una configuración muy similar a la de una presa convencional de retención de agua, con similares características estructurales en la mayor parte.

La presa del tipo «línea central» (centerline-type) mostrada en la Figura 5.1(c) se levanta colocando el relleno de la represa en el talud «aguas abajo» y sobre la cresta de la elevación previa. El método de «línea central» comparte muchas de las características estructurales de las presas tipo «aguas abajo», pero usa menos material de relleno para alcanzar la misma altura.

En efecto, la Figura 5.2 ilustra que las diferencias entre las cantidades de material de relleno colocado mecánicamente, y por lo tanto en el costo del relleno, pueden ser significativas entre los tres tipos de presas. Esto, en gran parte ha favorecido el uso tradicional del método de construcción «aguas arriba», aunque el Capítulo 1 anota que esta es una simplicidad que se acomodó muy bien en las épocas anteriores al desarrollo de la maquinaria moderna para el movimiento de tierras. Para contrarrestar esos factores debe recordarse la responsabilidad que

las presas tipo «aguas arriba» tienen en las fallas ocurridas de las presas de relaves en el pasado.

## 2. Efectos y Causas de las Fallas en las Presas de Relaves

### a) Deslizamiento de los Relaves

Cuando los relaves son liberados a través de una brecha en la presa del embalse, debido a la inestabilidad del talud, rebose, terremotos, o cualquiera otra causa, el resultado, en la mayoría de esos casos, es un «deslizamiento» o «falla de flujo» de los relaves, como el mostrado en la

Figura 5.3. En tales caso se libera cerca del 25% del contenido de los embalses pues los relaves saturados asumen su estado original de fluido bajo la influencia de las grandes tensiones inducidas en el depósito por la brecha del dique de contención. Moviéndose como una masa de lodo y desplazándose a velocidades de 15 a 50 kms. por hora, el deslizamiento de los relaves constituye el principal riesgo para la vida y seguridad de estos embalses de relaves. El cuadro 5.1 que se muestra a continuación presenta un resumen de los derrumbes de presas de relaves más conocidos y sus consecuencias.

El primer objetivo del manejo de relaves debe ser la mitigación de los derrumbes de relaves y sus efectos, previniendo las fallas en las presas. El riesgo de vida y de la seguridad también depende de la población expuesta aguas abajo.

Los procedimientos basados en el comportamiento de los deslizamientos observados han sido desarrollados mediante la estimación de la distancia que un deslizamiento de relaves puede eventualmente recorrer en terreno llano o de inclinación moderada (menos de 5 grados) antes de alcanzar el reposo (Lucía, 1981; Lucia, et. al., 1981; Vick, 1991). Sin embargo, los deslizamientos de relaves más destructivos son aquéllos que viajan con muy poco aviso a lo largo de cañones muy inclinados y estrechos. La experiencia muestra que éstos deslizamientos continúan hasta que alcanzan terreno plano o un cuerpo de agua estabilizado, y no hay método exacto o confiable para cuantificar las características de un deslizamiento de relaves bajo estas condiciones.

### b) Causas de Fallas Durante la Operación

Mucho es lo que se puede aprender del examen de las causas de anteriores fallas en las presas de relaves, y tal estudio ha incluido 106 de estas fallas reportadas en los Estados Unidos y en otros lugares, (USCOLD, 1994). El estudio distingue las presas activas de relaves, o sea aquellas que continuaban recibiendo descargas de relaves desde la concentradora en el momento de la falla, de los embalses inactivos o abandonados.

Hubieron 47 fallas documentadas de presas de relaves que operaban activamente con el tipo «aguas arriba» y 23 fallas de represas de relaves combinadas de los tipos «aguas abajo», de «línea central» y de «retención de agua». Las causas de las fallas de las presas en operación en estas dos categorías, son presentadas a continuación.

Para estas presas en operación, es aparente que la contribución relativa de las varias causas de fallas son sustancialmente diferentes entre las presas del tipo «aguas arriba» y los otros tipos. Claramente, los terremotos y la estabilidad del talud o dique son las principales causas en los tipos «aguas arriba», durante el período de operación. Ninguna causa singular predomina para otros tipos, aunque las fallas por infiltración (incluyendo el socavamiento) son de alguna manera más importantes que otras.

### c) Causas de Fallas Después de la Clausura

Un cuadro totalmente diferente emerge cuando consideramos las fallas posteriores a la clausura de operaciones causadas por las presas de relaves inactivas. Estas represas inactivas

son aquellas que no reciben relaves de la concentradora y que no retienen o colecten permanentemente agua superficial. Aunque no hay suficiente información para diferenciar fallas de presas inactivas de acuerdo con el tipo de presa, las causas de las fallas se muestran a continuación.

El Cuadro 5.3 muestra que han habido muy pocas fallas de presas de relaves que hayan sido reportadas durante el período de clausura, demasiado pocas para ser realmente representativas. Sin embargo, la única causa de falla de alguna significación parece ser el desborde, lo cual enfatiza la importancia de los factores hidrológicos en la elección del lugar, tal como se discutió en el Capítulo IV del punto 1.c.

La ausencia de fallas en los depósitos de relaves inactivos durante terremotos es especialmente sorprendente en vista de la aparente vulnerabilidad sísmica exhibida por los diques activos «aguas arriba» que estaban en operación según lo indicado en el Cuadro 5.2. Revisando el desempeño de más de 13 presas de relaves inactivas del tipo «aguas arriba» que han estado inactivas por períodos que van de 2 a 20 años, Vick, et. al. (1993), encontró que ninguna experimentó fallas de flujo aún soportando movimientos de tierra de alrededor de 0.40g resultantes de terremotos de  $M_s=7.0-7.8$ , aunque si produjeron resquebrajamiento del dique y algunas licuefacciones locales en las zonas de lamas. Esto aparentemente tiene que ver con la mejora en la estabilidad producida por el drenaje de largo plazo en las zonas arenosas del depósito o la presa, y tal vez con la consolidación durante largo tiempo, de los relaves de arena, debido al efecto de envejecimiento descrito por Troncoso (1990).

Cualquiera que sea la razón, el resultado final es de gran significado para la estabilidad física durante el período de post-clausura: el desempeño de las presas de relaves muestra que si el agua de una presa es extraída y no se permite su acumulación en la superficie, se puede alcanzar la estabilidad física del depósito en forma permanente después de un período razonable, digamos entre 5 y 10 años luego de finalizada la descarga de la concentradora. Esto debería ser aplicable a todos los tipos de presas de relaves incluyendo las represas del tipo «aguas arriba», siempre y cuando no existan lodos debajo del dique de contención. No hay razón para que la estabilidad no se mantenga indefinidamente durante el período de post-clausura, siempre y cuando se hayan tomado las medidas de ingeniería necesarias para la ubicación de la presa, así como para evitar la rotura de la misma por desborde, por efecto de inundaciones, o su destrucción por huaycos, y que el depósito esté seguro contra la erosión superficial causada por el viento y el agua. La preocupación por la estabilidad física en general, y los efectos de los deslizamientos de relaves en particular, están por lo tanto generalmente limitados al período de operación del embalse, en la mayoría de los casos.

### 3. Presas de Relaves del Tipo «Aguas Arriba» en el Perú

Una cantidad limitada de información sobre el desempeño de presas del tipo «aguas arriba» que operan en el Perú resulta similar a la mostrada en el Cuadro 5.2. Recientemente, en 1993 se produjo una falla en una presa de relaves del tipo "aguas arriba" debido al rebalse de una mina de oro en la zona norte del centro del Perú. Brawner (1995) identificó otras fallas por desborde (todas de una sola mina) causadas por un sistema inadecuado de decantación o derivación. Una falla sísmica en una presa del tipo "aguas arriba" en esta misma mina fue informada por Brawner (1979), lo cual añade dos más de estas fallas en el Perú (USCOLD, 1992)

## ESTABILIDAD

Además, las presas del tipo "aguas arriba" son aún más peligrosas que lo indicado anteriormente debido a los terremotos que ocurren en el Perú. Esto puede ilustrarse por algunos estimados generalizados de la probabilidad de la falla sísmica. Una revisión de las fallas por licuefacción de diques "aguas arriba" en operación sugiere que la falla puede ocurrir bajo aceleraciones puntuales del suelo con valores superiores a 0.15 g (Vick, 1990), local

corresponde a una intensidad de VII grados en la Escala Modificada de Mercalli (EMM) (Trifunac y Brady, 1975). El mapeo del riesgo sísmico efectuado por Casaverde y Vargas (1985) indica que esta intensidad tiene una recurrencia anual de aproximadamente 50 a 150 años de intervalo en la mayor parte del Perú donde en la actualidad hay actividad minera.

Si tomamos 100 años como un intervalo representativo de recurrencia para EMM=VII en la totalidad del país, entonces la probabilidad anual de un terremoto que pueda causar fallas en una presa particular del tipo "aguas arriba" en el Perú es de aproximadamente 0.01. La Sección anterior sugiere que los períodos de exposición sísmica durante los cuales las fallas pueden ocurrir están limitadas a la vida operativa del embalse, más un período adicional durante el cual el drenaje y el envejecimiento correspondiente producen mejoras, o tal vez un total de 20 años para muchas minas. En este caso, la probabilidad de falla sísmica de una presa típica del tipo «aguas arriba» en el Perú sería de 18%, o casi una posibilidad de uno en cinco.

Por comparación, en Norteamérica el diseño sísmico de presas de relaves se basa a menudo en movimientos de tierra que han tenido intervalos de recurrencia en el rango de 500 a 2500 años, con la correspondiente probabilidad de falla inferida, sobre el mismo período de 20 años, del 4.0% a 0.8%. Aunque estos estimados de riesgo son únicamente aproximaciones, sirven para ilustrar el hecho de que en el Perú las presas de relaves del tipo «aguas arriba» están sometidas a riesgos de falla sísmica más altos, tal vez de 5 a 50 veces más que lo comúnmente es aceptado para presas de relaves en otras partes del mundo, debido a su bien documentada estadística sísmica. En Chile, con una situación sismotectónica similar, los procedimientos «aguas arriba» han sido prohibidos por ley desde 1970, mayormente como resultado de la falla producida en 1965 en El Cobre y las fatalidades que ésta causó.

Las presas de relaves del tipo «aguas arriba» no son definitivamente apropiadas para las condiciones sísmicas en virtualmente todos los lugares del Perú, excepto posiblemente en condiciones excepcionales donde cualquier falla de flujo puede ser confinada por una barrera artificial o natural, tal como una depresión topográficamente cerrada. Por lo tanto, este tipo de presa no será tratado en las siguientes secciones de esta Guía, las cuales estarán limitadas a las presas de relaves de los tipos «aguas abajo», de «línea central» y de «retención de aguas», que sí son susceptibles de mejorar su resistencia a los efectos sísmicos mediante diseño y construcción adecuados. Antes de pasar a la conducta sísmica de los tipos actuales, sin embargo, se tratará los aspectos de estabilidad estática e hidrológica en las siguientes secciones.

#### 4. Estabilidad Estática Durante la Operación

La estabilidad «estática» se refiere a la integridad interna y externa de la presa bajo condiciones no sísmicas y no hidrológicas, incluyendo la estabilidad de sus taludes y sus cimientos contra deslizamientos; un control seguro de infiltraciones; y resistencia a la erosión interna, o transporte de partículas a través de la misma presa conocido como «socavamiento» («piping»). La estabilidad estática está controlada por las propiedades de los materiales de relleno de la presa y los suelos en los cuales se asientan.

##### a) Materiales de Relleno para la Construcción de Presas de Relaves

Cada construcción de una represa de relaves requiere de un dique de arranque, el cual por razones de economía es usualmente construido utilizando suelos naturales tomados del área del embalse. Para evitar conflictos con las actividades de arranque de la planta concentradora, el dique de arranque debe proporcionar suficiente capacidad de almacenaje de relaves, de tal manera que la primera elevación de la presa no necesite completarse hasta por lo menos 4 años después del inicio de la descarga de relaves al embalse. Para valles estrechos y empinados esto puede requerir alturas de 50 metros o más, de tal manera que el dique de arranque puede ser en sí mismo una estructura real.

La elevación de un dique puede continuar con suelos naturales si estos están disponibles. Este es el material más versátil para la construcción

de presas de relaves, pero no será práctico para la mayoría de las instalaciones en el Perú . Sólo las operaciones de tajo abierto ameritan trasladar equipos pesados de movimiento de tierra desde lugares muy distantes. Nuevamente el desmonte de minas de tajo abierto, puede proporcionar una fuente muy económica de material de relleno para la presa, si los embalses de relaves están cerca o por debajo del tajo puesto que este material debe ser excavado, transportado y vaciado en cada caso. Brawner (1979) da varios ejemplos de construcción de presas de relaves utilizando desmontes mineros y tierras naturales. Cualquier desmonte de mina usado en la construcción de una presa de relaves debe estar libre del riesgo potencial de ARD.

Finalmente, los relaves de arena cicloneada pueden proporcionar una excelente fuente de material para construcción de la presa, ya sea para operaciones de tajo abierto o subterráneas, siempre y cuando estén libres del riesgo potencial de ARD. Lighthall, et. al. (1989) y Vick (1990) describen varios procedimientos para la producción y colocación de arenas cicloneadas, y Klohn y Maartman (1972) nos dan excelentes ejemplos de construcción de presas de relaves utilizando estas arenas. Tales represas, sin embargo, requieren un cuidadoso planeamiento previo y una ejecución diligente de la construcción y su control. La producción de arena cicloneada debe ser suficiente para satisfacer los requerimientos de relleno de la presa en cada etapa de la vida de ésta, y la compensación para escasez de arena a elevaciones mayores de la presa pueden requerir diques de arranque más altos. También, las operaciones iniciales de arranque toman de 1 a 2 años para afinarse, y los materiales más críticos para la integridad de la presa son a menudo colectados durante este tiempo. Sin embargo, aún los mejores materiales no proporcionarán una estructura sólida a no ser que sean adecuadamente compactados.

#### b) Compactación

La compactación proporciona los principales medios de resistencia sísmica para el relleno de presas de relaves, y está demás sobre-enfatizar su importancia bajo las condiciones peruanas. El relleno de tierra o relaves debe ser compactado hasta por lo menos 90% o 95% de las máximas densidades secas obtenibles con las Pruebas de Compactación Modificadas (ASTM D-1557) o Estándar (ASTM D-698), respectivamente.

Una adecuada compactación del relleno de tierra puede alcanzarse usualmente colocándolo en capas horizontales delgadas (<0.3 m) seguidos por 4 a 6 pases del equipo compactador pudiendo utilizarse también camiones de transporte minero cargados. Para materiales tales como arena cicloneada, con menos del 10% de finos de 0.074 mm, los requerimientos de una densidad relativa estarán alrededor de 75-80%. Los compactadores vibratorios y aún los bulldozers pueden compactar eficientemente este tipo de materiales limpios. Tanto el relleno de tierra como la arena cicloneada deben ser inspeccionadas y probadas durante la colocación y construcción de las presas de relaves, para asegurar que el material y su compactación estén dentro de las especificaciones deseadas.

El relleno con desmonte de mina es diferente porque su tamaño más grueso no requiere las pruebas de rutina de densidad del relleno, y se adoptan mas bien los requisitos del procedimiento. Un grado adecuado de compactación puede ser logrado en muchos casos si se distribuye el material en capas horizontales de aproximadamente 1 m de espesor y se le somete a compactaciones de por lo menos 5 pasadas de camiones cargados (>120 Tns de capacidad) sobre la superficie completa de cada capa. Esto requiere que las rocas de tamaño mayor que el espesor señalado sean retiradas del relleno, usualmente con la cuchilla de un bulldozer durante su esparcimiento. La colocación del desmonte de la mina mediante vaciado únicamente, sin esparcimiento y compactación, no produce un relleno de aceptable calidad para las zonas estructurales de la presa.

#### c) Filtros y Drenes

El control de la infiltración interna dentro de la presa por medio de drenes para reducir los niveles de saturación o la «superficie freática», y zonas de filtración para prevenir el

socavamiento, son esenciales para la estabilidad estática. Como se indica en el Cuadro 5.2 la infiltración es una causa significativa de las fallas de las presas «aguas abajo», de «línea central» y de «retención de aguas». Muchos de esos casos están relacionados con la infiltración emergente en la cara del dique y pueden ser prevenidos con la inclusión de drenajes internos adecuados. Las arenas cicloneadas también requieren de drenes para remover el agua de descarga interior del ciclón que las acompaña durante su disposición.

Klohn (1979) y Griffin (1990) revisaron los requerimientos de filtración y drenaje para presas de relaves, mientras que Velarde, et. al. (1983) describe el diseño y técnicas de ubicación de los filtros para una presa de relaves de oro.

Los filtros son especialmente importantes para prevenir la migración de los relaves dentro y a través del desmante minero grueso. Los filtros requieren un control muy cuidadoso durante su colocación y el lavado y cernido del material del filtro, estos procedimientos no son compatibles con las condiciones y economía del minado. Una ubicación «selectiva» de las porciones más finas y gruesas del desmante de mina

para cumplir funciones de filtro puede no ser confiable. Como una buena alternativa se pueden utilizar telas sintéticas en las presas de relaves, y confiar en que resistirán los procesos de deterioro que ocurran durante la vida operativa de la mayoría de los embalses. Kulesza (1991) nos da algunos ejemplos recientes de telas especiales empleadas en presas de relaves y en aplicaciones similares; una discusión sobre esto se presenta en el Capítulo VII.

#### d) Materiales Para los Cimientos de la Presa

Varios tipos de suelos de cimentación potencialmente adversos han sido identificados en el Capítulo IV del punto 1.d y los suelos arcillosos saturados requieren una atención particular. Las arcillas suaves y aún las rígidas pueden causar problemas de estabilidad operacional del talud, porque su rigidez inicial durante las investigaciones previas a la construcción pueden ser engañosas. Asumiendo que los efectos sobre la resistencia de factores tales como el figuramiento son tomados en cuenta, puede considerarse que las arcillas rígidas se comportarán usualmente bien con cargas correspondientes a las etapas iniciales de una presa de relaves, hasta la máxima presión histórica de la arcilla, la misma que se deriva del ambiente geológico y climático posterior a su deposición geológica. Sin embargo, las presas de relaves de más de 20-40 metros de altura pueden a menudo exceder este esfuerzo, causando una brusca reducción de la disipación de la presión de poro y un comportamiento contractivo durante el esfuerzo cortante sobre las arcillas del cimiento. La estabilidad de la presa para estas condiciones requiere del uso de métodos especiales de análisis de la resistencia al esfuerzo cortante (Ladd, 1991), y puede ser necesario utilizar en la presa taludes sustancialmente más suaves cuando los cimientos son arcillosos.

#### e) Monitoreo de la Construcción, Inspección y Supervisión

El diseño y construcción son procesos que usualmente se desarrollan conforme la presa se va elevando durante la vida de la mina. Los informes de las inspecciones que documentan la configuración de la presa conforme ésta es levantada, son parte necesaria de la operación de construcción. Además, es esencial la instalación y monitoreo de piezómetros para medir la superficie freática dentro de la presa. La represa debe ser inspeccionada visualmente a diario buscando cualquier signo de inestabilidad, y estas inspecciones deben anotarse, así como las observaciones, construcción, compactación y los registros de instrumentación, los cuales deben ser cuidadosos y mantenidos por la empresa minera.

Periódicamente, y a intervalos no mayores de unos pocos años, una completa revisión de los parámetros de diseño y de todos los informes anteriores debe ser efectuada por un ingeniero geotécnico que tenga experiencia especializada en presas de relaves. En dicha instancia, cualquier problema existente o futuro puede ser identificado, y el diseño o construcción de la presa modificado conforme convenga. Los reportes sobre el diseño y construcción son esenciales para este propósito; sin ellos la información necesaria puede obtenerse únicamente

mediante perforaciones y muestreos, con un costo considerable para la operación.

## 5. Estabilidad hidrológica

### a) Criterios de Diseño

La estabilidad hidrológica del embalse es materia de preocupación tanto durante el período operacional como durante el de post-clausura, pero especialmente durante este último como se mostró en el Capítulo V del punto 2.c. Con el propósito de controlar las inundaciones, ICOLD (1989) recomienda que las «mayores» fallas en las presas de relaves que pudieran causar pérdida de vidas y grandes daños a la propiedad sean designadas como la Inundación Máxima Probable o IMP. El IMP es derivado de la combinación de la Precipitación Máxima Probable o PMP, en las condiciones más desfavorables. El PMP, a su vez, es definido como:

«la máxima precipitación teórica para un tiempo dado, que es físicamente posible sobre un área de tormenta determinada, en una ubicación geográfica particular, en cierto momento del año» (NRC, 1985).

En la práctica, el PMP es estimado a base de la combinación más severa de las condiciones meteorológicas y orográficas que se consideran posibles bajo las condiciones climáticas existentes.

Aunque el PMP no está derivado de un análisis estadístico de data histórica, se ha asociado en Norteamérica con la precipitación en intervalos de recurrencia mayores a 10,000 años. Para ilustración, el PMP en los Estados Unidos es a «grosso-modo» 2 a 3 veces las lluvias de 100 años de las regiones costeras del Pacífico; y 3-5 veces las lluvias de 100 años de las cuencas tierra adentro, de las montañas y regiones desérticas en el Oeste de USA; y 4 veces las lluvias de 100 años en La Florida subtropical (NRC, 1985). En el Perú, la limitación de información meteorológica afecta seriamente la determinación de estimados precisos de PMP, y las evaluaciones de PMP pueden ser complicadas por las contribuciones de los deshielos en los lugares más altos de la Sierra. Los efectos oceánicos asociados con las anomalías de El Niño pueden ejercer una influencia controladora en la región costera. Los estimados de PMP son usualmente necesarios para el diseño de grandes presas, y los procedimientos usados por Electroperú pueden ofrecer una guía útil al respecto.

### b) Sistemas de Decantación Durante la Operación

Durante la operación de una presa, los canales de desfogue convencionales y abiertos no pueden ser usados debido a la elevación constante de la superficie de los relaves. En su lugar, se recurre a una sobrecarga temporal del almacenamiento detrás de la presa, en combinación con sistemas de decantación para evacuarla (Cassidy y Hui, 1990). Estos sistemas son los mismos usados para retornar agua a la concentradora, y son de tres tipos, como lo indica Forbes, et. al. (1990).

Las torres de decantación son estructuras verticales levantadas junto con los depósitos de relaves, que se extienden horizontalmente por debajo de la presa para evacuar agua por gravedad. Los problemas de estabilidad debido al socavamiento de estos conductos ocurren frecuentemente, y representan la mayoría de las fallas estructurales en la categoría mostrada en el Cuadro 6.2. Las estructuras de metal se corroen eventualmente, permiten el ingreso de relaves por las uniones, o se rompen debido al asentamiento, y el concreto es susceptible de sulfatarse. Estas condiciones pueden crear un riesgo para la integridad de la presa. Además, el diseño sísmico de la torre vertical es especialmente difícil debido a las magnitudes impredecibles, la distribución de las fuerzas laterales y al efecto de flotación en los relaves licuefactados. Algunos de esos problemas sísmicos son reducidos por medio de las estructuras de decantación del tipo chute o ladera que reemplazan a la torre vertical con un conducto que se extiende hacia arriba a lo largo de la superficie del terreno natural del embalse conforme se incrementa la elevación de los relaves. Las torres de decantación, canales de fondos y otros

dispositivos similares no son en modo alguno recomendables para el Perú y su uso debería ser prohibido por Ley.

El tipo final de sistemas de decantación es una barca flotante con bombas o sifones. Este sistema es preferido a menudo debido a su facilidad de reubicación y operación, y elimina los riesgos sísmicos y estructurales asociados con los sistemas de flujo por gravedad. Sin embargo, las fallas en el suministro de energía durante tormentas intensas puede interrumpir operaciones en el momento en que éste es más necesario.

La mayoría de los embalses que contienen efluentes tóxicos como es el caso de los relaves cianuración de oro y plata están diseñados para retener completamente todo el agua que ingresa por inundación bajo condiciones operacionales, para su eventual evaporación y/o uso de las aguas captadas por la concentradora. Debido a la incertidumbre que hay en el Perú para estimar estos ingresos por inundación, aún los sistemas cerrados de almacenamiento deben tomar provisiones de emergencia para la salida del exceso de agua de inundación considerando una cantidad razonablemente predecible durante la operación, digamos 100 años de recurrencia de inundación. El riesgo potencial que representa la improbable descarga de una cantidad inusual de efluentes diluïdos dura nte la inundaciones es completamente contrareestado por las consecuencias ambientales mucho más importantes que significa el desborde potencial de la presa, su fisura y el deslizamiento de los relaves retenidos.

#### c) Uso de Conductos de Desfogue Después de la Clausura

El manejo de las inundaciones durante el período de post-clausura debe anticipar la ocurrencia de grandes ingresos de agua por inundación sin requerir mantenimiento de las estructuras. Los conductos enterrados de los sistemas de decantación son susceptibles de obstruirse con los desechos y sufrir eventual deterioro y colapso. No es posible confiar en estos sistemas por largo tiempo, y deben ser rellenos completamente y obturados durante la clausura.

Similarmente, sin un mantenimiento permanente de la presa durante el período posterior a la clausura no se puede utilizar de manera segura una sobrecarga en el almacenamiento del agua de inundación dentro del embalse a fin de permitir el ingreso de flujos PMP. En cambio, la nivelación y reacondicionamiento de la superficie de los relaves puede ser considerada para eliminar las acumulaciones de agua y reducir los flujos concentrados de escorrentía. Se pueden diseñar desfogues (sistemas de alivio) de canal abierto para manejar las descargas remanentes, debiendo dar preferencia a los canales anchos abiertos en la roca que no requieran de mantenimiento. No son recomendables los aliviaderos de concreto, dado que sin mantenimiento regular, rara vez continúan en servicio por más de 50 años).

Problemas típicos del manejo de inundaciones post-clausura son ilustrados por una mina en el Perú donde se han abierto túneles para desviar flujos de agua alrededor de presas de relaves inactivas que tienen áreas muy grandes de drenaje «aguas arriba». Aunque su construcción es costosa, los túneles no tienen suficiente capacidad para transportar inundaciones extremas. Se requiere mantenimiento continuo a fin de limpiar las rocas y desechos de la entrada del túnel, y en algunos puntos los túneles tendrán que ser cerrados para efectuar reparaciones internas. Esto deja a las torres de decantación originales en los embalses existentes como la única forma de desviar los cursos de flujo de la base, significando que las torres de decantación y los conductos deben ser también mantenidos permanentemente en servicio. Como se enfatizó en capítulos anteriores, la elección adecuada del embalse y la consideración que se dé a las alternativas para disponer los relaves, probablemente proporcionan los únicos medios prácticos para resolver estos problemas.

## 6. Estabilidad Sísmica

Como se explicó en el Capítulo V del punto 2.c, la estabilidad sísmica tiene importancia solamente durante la operación y poco tiempo después durante períodos usualmente asociados con la etapa de clausura. La seguridad sísmica post-clausura del embalse contra deslizamientos está asegurada virtualmente supuesto que no permanece agua en su superficie. Ya que las presas de relaves del tipo «aguas arriba» son consideradas inconvenientes para el Perú (ver Capítulo V, punto 2), esta sección considera únicamente condiciones operacionales para presas de relaves de los tipos «aguas abajo», «línea central» y «retención de agua».

El análisis sísmico de las presas de relaves es un tópico muy complejo cuya tecnología está emergiendo, con algunos ejemplos recientemente mencionados por Finn y colaboradores (1990), Lo y Klohn (1990), Edwards (1990), y Vick y colaboradores (1993). Sin embargo, la aplicación de estos análisis avanzados para el diseño de las presas de relaves en el Perú debe ser considerado cuidadosamente a la luz, tanto de los niveles de sismicidad como de las incertidumbres asociadas con su predicción en el país.

Las normas internacionales sobre seguridad en presas de relaves recomiendan el diseño de acuerdo al Máximo Terremoto Creíble, o MTC, para «las mayores presas de relaves donde pueda ocurrir una falla causante de pérdidas de vida y propiedad», en donde el MTC es definido como «el terremoto hipotético cuya ocurrencia puede esperarse según las fuentes potenciales sísmicas regionales y locales, capaces de producir los movimientos de tierra más severos en el lugar» (ICOLD, 1989). La Figura 5.4 muestra un mapa del Perú señalando los riesgos sísmicos y proporciona las cifras de «aceleración pico» del suelo (APS) para un intervalo de recurrencia de 475 años. Estos valores pueden aproximarse bastante a los movimientos de tierra MTC en muchas áreas del Perú debido a la frecuencia de grandes fenómenos de subducción, y este intervalo de recurrencia corresponde al adoptado frecuentemente para el diseño de presas de relaves en Norteamérica.

Existen varias dudas asociadas con los niveles (APS) en la Figura 5.4, incluyendo datos limitados sobre la atenuación del movimiento del suelo en el Perú; efectos de la profundidad focal y distancia hipocentral de la atenuación; y la zonificación de las fuentes sísmicas. Adicionalmente, los valores (APS) mostrados en la Figura 5.4 son aquéllos generados por eventos de subducción solamente y no consideran las fallas de la corteza terrestre, lo cual puede producir valores APS localmente mayores que aquellos mostrados en los niveles de los 475 años de riesgo. Estas dudas implican que, en general, puede existir un valor limitado el realizar análisis dinámicos altamente sofisticados para diseñar presas de relaves en el Perú, cuando los parámetros sísmicos están sujetos a tales variaciones.

Al mismo tiempo, está claro que las aceleraciones del terreno a este nivel de riesgo son muy altas (por lo menos 0.3 a 0.4g para la mayor parte del país donde se realiza la actividad minera) y los valores actuales pueden ser todavía más altos cuando las fallas locales de la corteza terrestre son tomadas en cuenta. Esto implica que los enfoques simplificados, pero conservadores, son justificados para el diseño sísmico de las presas de relaves y algunas prácticas y procedimientos son por ello propuestos en la siguiente sección.

#### a) Licuefacción de los Cimientos

Seed (1987) distingue entre el inicio de una licuefacción y la conducta post-licuefacción de los suelos que son susceptibles a este fenómeno, y describe una filosofía de diseño que se explica aquí. Con la compactación del relleno de la presas de relaves, de acuerdo a las especificaciones

descritas en el Capítulo V , se previene la licuefacción del material del dique. Por lo tanto, la licuefacción de los suelos de los cimientos de la presa constituye un área de máxima preocupación.

Aunque los valores precisos de (APS) y las correspondientes fuerzas cíclicas de corte inducidas son inciertas, los niveles generales son tan altos que se gana muy poco al realizar análisis extensos de la respuesta dinámica o el inicio de licuefacción bajo las circunstancias más comunes en el Perú. En lugar de esto, la licuefacción debe ser asumida como que ocurrirá en todas las arenas saturadas, limos, desmontes y grava que tengan un (N1)60 corregido menor que aproximadamente 20 según las Pruebas de Penetración Estándar (PPS) determinadas cuidadosamente de acuerdo al procedimiento señalado por Seed y colaboradores (1985). Mientras que la licuefacción, en un sentido estricto, puede ocurrir en suelos con valores de (N1)60, algo más altos, su daño potencial ante el esfuerzo de corte debería ser limitado. La PPS es una prueba simple de campo conducida durante la perforación y muestreo y la tecnología apropiada junto con el equipo necesario deberían estar disponibles en el Perú. Se puede contribuir con las pruebas PPS sobre gravas mediante el uso de muestreadores de mayor diámetro, pero los martillos perforadores diesel Becker para determinaciones exactas (Evans y Harder, 1993) no parecen estar disponibles, de modo que las estimaciones de densidad «in situ» en piques de poca profundidad tendrán que ser suficientes.

Los suelos de los cimientos, en los cuales la licuefacción puede producirse deben ser eliminados desde el área debajo del dique hasta los límites extremos de la presa. Si las consideraciones prácticas hacen esto imposible, entonces a éstos suelos se les debe asignar una resistencia al corte residual sin drenaje, post-licuefacción ( $S_r$ ) de la figura 5.5, usando un valor aproximado a un tercio entre el más bajo y el más alto de los límites mostrados (Marcusen, et. al., 1990). Pueden realizarse los análisis de estabilidad usando estos valores de resistencia pero puede que sea necesario proporcionar taludes muy planos, a fin de alcanzar un grado adecuado de estabilidad si los suelos susceptibles de licuefacción van a permanecer en el lugar.

El método de análisis de estabilidad llamado «pseudo-estático» es conocido como obsoleto y no debe ser aplicado, sea que estén presentes o no suelos licuefactables.

#### b) Deformaciones Sísmicas

Aún cuando la estabilidad global de la presa se mantenga durante un terremoto, puede, sin embargo, experimentar deformaciones que la deterioren, incluyendo el asentamiento de la cresta y el abultamiento del dique, junto con rajaduras. Es posible obtener una evaluación aproximada de las deformaciones sísmicas para presas bien construidas, sobre bases firmes y cimientos no licuefactables. En la mayoría de los casos las investigaciones apropiadas sobre la ubicación de las presas de relaves y/o la remoción de suelos licuefactables proporcionará una cimentación firme, y el cumplimiento de los criterios de compactación previstos en el Capítulo V del Punto 4.b, permitirá asegurarse contra la licuefacción de los materiales de relleno de la presa. Basados en el comportamiento de las presas de tierra observados durante movimientos telúricos, Seed, et. al. (1987) plantearon las siguientes conclusiones generales para aquellas presas que tuvieran materiales de relleno o cimentación no licuefactables:

«Virtualmente cualquier represa bien construida puede soportar movimientos telúricos

moderados, por ejemplo con picos de aceleración de aproximadamente 0.2g y más, sin sufrir efectos perjudiciales. Las represas construidas de suelos arcillosos sobre cimientos de arcilla o roca han soportado sacudidas extremadamente fuertes de 0.35-0.8g con una magnitud de terremoto de 8.25 sin daño aparente».

Estas conclusiones también se aplican en un sentido general a las presas del tipo «aguas abajo», «línea central» y «retención de agua» construidas con materiales similares y empleando compactación adecuada y buenas prácticas de construcción.

Los asentamientos de la cresta inducidos sísmicamente pueden ser estimados si es que no existe material licuefactable, se emplea para ello procedimientos simplificados tal como los de Makdisi y Seed (1978), que son aplicables en forma aproximada a las presas de relaves. Velarde, et. al (1983) dan un ejemplo de tal enfoque. Sin embargo, se mantendrán las dificultades para determinar valores exactos de las aceleraciones pico del suelo, y los rangos generales de asentamientos de la cresta a partir de los datos de la Figura 5.6 (el cual está normalizado para la altura del dique junto con el espesor del suelo de los cimientos) puede servir igualmente bien en muchos casos.

Tal método para estimar la deformación sísmica puede proporcionar un indicador elemental de la cantidad de rajaduras de la presa que se pueden anticipar, así como el de daño potencial a otras facilidades, tales como las tuberías de distribución de los relaves en la presa o los recubrimientos sobre su flanco «aguas arriba».

## MITIGACION DE ARD

### Capítulo VI. Mitigación de ARD en relaves

En el Capítulo I se presentó un breve antecedente de las condiciones y problemas ambientales relacionados con la generación de ácido o ARD en los depósitos de relaves. Este capítulo complementa esa introducción describiendo algunas de las técnicas disponibles para reducir los efectos del ARD. En el Perú se encuentran minerales sulfurados en significativas proporciones en áreas húmedas con alta precipitación, haciendo de la generación de ARD un asunto muy importante en el manejo de los relaves.

#### 1. Estado de la Tecnología

La tecnología del control de ARD se encuentra aún en estado de investigación. Los procesos químicos y biológicos que producen ARD son en la actualidad bastante bien entendidos y la mayor parte de la investigación está dedicada a los métodos geoquímicos y analíticos para el estudio de determinados depósitos minerales y condiciones climáticas. En la práctica, sin embargo, existen muy pocas minas en las cuales los métodos de control de ARD han sido integrados a las operaciones mineras desde el comienzo, y son aún menos aquéllos donde los estudios de seguimiento han documentado la aplicación de estos métodos por un tiempo significativamente largo en el período post-clausura, donde los problemas de ARD tienen sus efectos más persistentes y dañinos para el ambiente. La tecnología actual, por lo tanto, nos proporciona poca

experiencia práctica a partir de la cual podamos evaluar la efectividad y éxito de las medidas de control de ARD en general, para las condiciones específicas en el Perú. En la práctica, la mayor parte de dicha tecnología ha sido aplicada en un contexto de corrección para minas abandonadas en las cuales las condiciones de ARD son excepcionalmente severas, y tales esfuerzos de mitigación como, «último recurso», están muy lejos de ser óptimos con respecto a su implementación y a sus resultados.

En el Perú, como en cualquier otro lugar, no existe tecnología apropiada, que pueda asegurar la completa eliminación de ARD bajo todas las condiciones. Las medidas de control disponibles son generalmente capaces de reducir los efectos de ARD a un grado u otro, aunque es muy difícil predecir hasta dónde se puede llegar. El potencial para ARD puede, por lo tanto, ser visto en algunos aspectos como una consecuencia casi inevitable del minado de minerales altamente sulfurados. Sus efectos pueden ser reducidos si el problema potencial es reconocido y tratado desde el inicio del planeamiento a fin de tomar en cuenta y reducir estas diferencias.

La investigación actual de ARD es también geográfica y físicamente fragmentada de acuerdo con sus fuentes de origen, así tenemos el drenaje de agua de las grietas de las minas, del desmonte de mina, y de los relaves de la concentradora. Obviamente, para cualquier mineral capaz de producir condiciones ARD, estas tres fuentes deben ser tratadas en forma integral, pero muy poco de la información disponible sobre los procesos de ARD o sobre las técnicas de mitigación, han sido desarrolladas teniendo en mente específicamente los relaves. Mientras que en los campos de carbón del Este de los Estados Unidos se ha dedicado mucha atención al drenaje de agua ácida superficial de las minas sub-terráneas, el desmonte de minas superficiales ha sido objeto de mucha investigación y desarrollo de trabajos de campo sobre ARD en Canadá, Suecia y Australia. Las minas superficiales producen de 2 a 4 veces más desmonte que relaves, y la difusión de oxígeno y el movimiento del agua procede sin impedimento debido a la naturaleza gruesa del material. Los relaves, por otra parte, tienen un contenido más alto de sulfuros pero características de difusión e infiltración más bajas y son influenciados sustancialmente por la deposición hidráulica. El estudio de las características específicas para los relaves debe tomar en cuenta y reducir estas diferencias.

## 2. Procesos ARD en Relaves

Como se explicó en el Capítulo I, el ARD no afecta cada depósito de relaves y depende del contenido de sulfuro, características geoquímicas así como del ambiente climático e hidrológico específico para cada cuerpo mineralizado. Los factores que determinan el potencial para ARD y su predicción no constituyen el principal enfoque de esta Guía. Sin embargo, para circunstancias específicas donde el potencial de ARD existe, hay varios mecanismos que operan simultáneamente dentro del depósito de relaves. Es conceptualmente útil idealizar éstos procesos como discretos, y que en conjunto producen efectos ambientales adversos:

Oxidación. La oxidación de los sulfuros se iniciará conforme las porciones del depósito devienen en no saturadas, permitiendo el ingreso de aire hacia los vacíos o hacia la superficie de los relaves durante la deposición inicial en playas de relaves o durante el drenaje por gravedad de zonas arenosas. Debido a que parte del depósito permanece saturado durante la operación, y porque los reactivos de flotación como cal y los minerales carbonatados suelen estar presentes en los relaves, la acidificación severa puede no ser aparente durante la operación del depósito de relaves.

Acidificación. El ácido producido por la oxidación inicial, da inicio a la disolución de metales a través del depósito, conforme se dispersa en el agua superficial del embalse y en el agua ocluida en los relaves por procesos de difusión y gradientes de infiltración. La continua oxidación de las zonas no saturadas mantiene el suministro de ácido.

Transporte. El drenaje por gravedad y las infiltraciones transportan metales y otros constituyentes disueltos más allá de los límites del embalse, de donde pueden alcanzar las aguas superficiales o subterráneas. En climas secos, las gradientes de capilaridad inducidas por el secado de la superficie pueden concentrar y depositar estos constituyentes en la superficie de los depósitos de relaves, haciéndolos disponibles para ser dispersados por aguas de desagüe o restringiendo el crecimiento de vegetación durante la rehabilitación de la superficie.

Cualquier tecnología de control de ARD busca intervenir en estos procesos, los cuales aún en la ausencia de controles, están influenciados fuertemente por el ambiente natural específico del lugar. Es bien conocido que las condiciones húmedas magnifican la severidad de los problemas de ARD, pero en este respecto, la lluvia continua y regular es probablemente menos dañina que los períodos húmedos y secos alternados. Aquí, la extensa oxidación ocurrirá durante el drenaje y episodios secos, que produce a su vez un reservorio de ácido y metales disueltos que son transportados durante los períodos húmedos. La severidad total de los efectos de ARD estarán relacionados a la frecuencia y duración de estos ciclos de remojo. En los climas secos, la lluvia puede ser suficientemente escasa lo que hace que el transporte sea también muy poco frecuente, y las grandes profundidades a las que se encuentran las aguas subterráneas en tales regiones pueden evitar que la infiltración contaminada con ARD alcance los acuíferos.

Las características propias del acuífero juegan un rol principal en determinar la degradación causada por ARD. En uno de los pocos casos publicados que tratan específicamente de los relaves, Stewart, et. al. (1990) muestra que los efectos de la infiltración de agua conteniendo ARD de un depósito de relaves de cobre en una región semi-árida fueron bruscamente reducidos mediante dilución, amortiguación del pH y la precipitación de los metales disueltos en el acuífero permeable. Otros acuíferos similares en regiones semi-áridas del Oeste de los Estados Unidos que han sido afectados por ARD difundido de varias fuentes por más de un siglo, sólo han mostrado un avance en el desplazamiento de sulfatos, en su mayor parte debido a estos procesos. En otras partes, a grandes elevaciones, sin embargo, los flujos permanentes de aguas superficiales derivados del deshielo transportan metales disueltos y afectan especies sensibles de peces por muchas decenas de kilómetros aguas abajo hasta que los afluentes producen una dilución suficiente. Los efectos adversos de ARD, por lo tanto, dependen no solamente de los procesos en los cuales son generados y transportados, sino también de los requerimientos del habitat de los arroyos, los usos en el consumo del agua superficial, y del desarrollo y utilización del agua subterránea.

En los casos en donde los procesos naturales no son suficientes para alcanzar las reducciones deseables en los efectos de ARD, se pueden considerar varios métodos disponibles para reducir estos efectos en los relaves, tal como se describe en las siguientes secciones.

### 3. Métodos de Mitigación de ARD

## a) Tratamiento del Agua

Los flujos superficiales acidificados provenientes de los embalses de relaves pueden ser colectados y tratados con cal de neutralización, como se describen en la British Columbia Acid Mine Drainage Task Force (1989). Las plantas de tratamiento de agua son el último recurso para solucionar el problema de ARD. Ellas son costosas, requieren grandes cantidades de cal procesada proveniente de fuentes cercanas, y producen grandes cantidades de lodos con metales los cuales en sí mismos presentan problemas de disposición. Sólo las descargas superficiales pueden ser tratadas en este caso, y la protección del agua subterránea requerirá recubrimiento de los embalses o medidas similares. Más importante es el hecho de que, las plantas de tratamiento requieren operación y mantenimiento a perpetuidad porque la duración de la generación de ARD es, en sí misma, ilimitada. Esto a su vez requiere compromisos financieros e institucionales a perpetuidad. Aún si una operación minera puede proporcionar apoyo financiero posterior a la clausura, la operación de la planta de tratamiento no es una carga deseable o razonable para la mayoría de las entidades gubernamentales. Un tratamiento activo de agua no es en general una solución apropiada para ARD en las condiciones peruanas, excepto posiblemente para casos especiales que involucren el cuidado de minas ya abandonadas.

Los metales pueden ser eliminados por las bacterias reductoras de sulfatos, en terrenos húmedos artificialmente contruidos, un tipo de aproximación o enfoque que se soporta a sí mismo y es altamente deseable. Sin embargo, esta tecnología no parece ser conveniente para grandes flujos de ARD o aquellos que fluctúan ampliamente en volumen o concentración de metal. Su potencial primario parece ser mas bien similar a una etapa de acabado o refinamiento para las plantas activas de tratamiento.

## b) Sumergencia

La oxidación puede ser prevenida, en primer lugar, si la totalidad del depósito de relaves es mantenida bajo el agua. Usualmente una profundidad de agua de 1-2 metros es considerada suficiente para reducir los efectos del oxígeno disuelto y de las olas. Esta es una solución muy efectiva y puede ser fácilmente implementada durante la fase operacional de los embalses superficiales si las represas de relaves son diseñadas específicamente para acomodarse a estas condiciones. También durante la operación, un suministro de agua controlado y adecuado puede ser garantizado, asegurando suficiente capacidad al sistema de agua de la concentradora, para compensar las pérdidas evaporativas y las condiciones de sequedad. Cualquier descarga de agua superficial requerida durante la operación puede tener que ser tratada antes de su descarga si es que los relaves contienen sustancias solubles, tales como el arsénico.

Para que ésta sea una estrategia conveniente de control de ARD para la post-clausura, la inmersión de los depósitos de relaves debe ser permanente pues, al igual que el tratamiento de agua, le conciernen problemas similares. Se debe garantizar un suministro confiable de agua, requiriendo ya sea su permanente operación o sistemas de bombeo o diseño de la represa de relaves para derivar y transportar grandes cantidades de agua superficial en los períodos secos.

Además, cualquier depósito de relaves que retenga permanentemente agua superficial será siempre vulnerable a las fallas de la represa y a los deslizamientos causados por los desbordes de inundación y terremotos. A no ser que una inspección de la represa, un programa de

mantenimiento y de seguridad (por ejemplo el mismo que es requerido para cualquier represa hidroeléctrica) sea puesto en ejecución e implementado indefinidamente, la inmersión permanente durante el período de post-clausura reducirá únicamente los riesgos de ARD a costa de riesgos crecientes contra la estabilidad física. En vista de la incertidumbre en los estimados hidrológicos y riesgos sísmicos claramente documentados en el Perú, la inmersión permanente no es una estrategia adecuada para la mitigación de ARD en la etapa de post-clausura en este país.

Estos problemas de estabilidad física son evitados con la disposición submarina de relaves, tal como se describe en el Capítulo III punto 3. Ella tiene el potencial para ser una estrategia ideal de control de ARD y del método de disposición general bajo condiciones favorables, pero las interrogantes con respecto a los efectos de relaves altamente sulfurados sobre los organismos marinos están todavía por resolverse.

### c) Separación de la Pirita

El exceso de pirita de los minerales sulfurados relacionados, que causan ARD, puede ser eliminado mediante la flotación que se emplea para cualquier otro mineral. Si es así, la generación superficial de ARD a partir de los relaves puede ser eliminada, siempre y cuando se provean las medidas convenientes para manejar el concentrado de pirita. Si la pirita removida constituye una porción razonablemente pequeña de los relaves (menos de 20-30%) puede ser práctico bombear el concentrado a una instalación segura, a una distancia favorable, en un lugar también conveniente. Los costos de hacerlo así pueden ser fácilmente compensados por la posibilidad de usar menos medidas restrictivas de control de ARD con respecto a los relaves remanentes, químicamente benignos.

Alternativamente para minas subterráneas, los concentrados de pirita pueden ser enviados a las labores de la mina como relleno (ver Capítulo III punto 2), a ubicaciones dentro de la mina que serán inundadas al restablecerse el flujo normal de las aguas subterráneas, una vez que cesen las operaciones de minado. Durante la operación activa de la mina ocurrirá la oxidación de la roca del subsuelo expuesta, así como del concentrado de pirita relaves sulfurados utilizados como relleno. El tratamiento de las descargas de aguas de mina será también requerido, pero el cono de depresión del drenaje de la mina servirá para prevenir la migración de contaminantes a las aguas subterráneas. Al término de las operaciones de minado y con la inundación de la mina, los sulfatos y los metales disueltos descenderán eventualmente hacia las aguas subterráneas como un contaminante temporal y discreto. Los estudios, de la química del agua subterránea de minas productoras de ARD inundadas con posterioridad al minado han reportado reducciones razonablemente rápidas en las concentraciones de sulfatos conforme el contaminante se ha trasladado a través de pozos muestreados durante la recuperación del agua subterránea (Toran y Bradbury, 1985), y puede por ello esperarse efectos similares de los rellenos con concentrados de pirita o con relaves altamente sulfurados. La permanente inmersión del material de relleno durante el período de post-clausura eliminará la oxidación y por lo tanto la fuente de estos contaminantes en el largo plazo.

Aun sin la separación de la pirita, el relleno con relaves altamente sulfurados ofrece beneficios significativos al ARD superficial, si las arenas son usadas en el subsuelo de tal manera que los lodos permanezcan disponibles para su disposición superficial. La capacidad natural de retención, de agua por parte de las lamas, puede asegurar la saturación en la mayor parte del depósito, proporcionando un factor pasivo

limitante sobre la cantidad de ARD que puede ser generada. Los embalses multicelulares, en combinación con el relleno también pueden ofrecer la oportunidad para colocar relaves de arena en las zonas más bajas del embalse superficial, donde recubiertos por lamas, son menos susceptibles a la oxidación y al transporte de ácido por percolación. Esto constituye en esencial la «cubierta saturada», cuyo concepto es discutido en el Capítulo VI .

#### d) Cubiertas «secas»

Este método se refiere a la construcción de una cobertura de baja permeabilidad, de arcilla u otros materiales utilizando equipo de construcción convencional, colocando y compactando el material. La cobertura convenientemente inclinada y nivelada, previene la acumulación de las escorrentías y reduce la infiltración en condiciones de post-clausura, a la vez que restringe simultáneamente el ingreso de oxígeno a los relaves (Yanful, 1993). Dichas coberturas han sido utilizadas para el control de ARD en los depósitos de desmonte de mina y los resultados de unos pocos casos bien instrumentados son descritos por Bennet, et. al. (1988). Estudios similares que documenten su efectividad para reducir la oxidación en los depósitos de relaves no han sido aún publicados.

Las predicciones de infiltración a través de las coberturas se hacen a menudo utilizando el código de computación HELP que combina factores climáticos y principios de flujos no saturados que utilizan un enfoque de balance de agua (Schroeder, et. al., 1984). Los resultados son extraordinariamente sensibles a los parámetros de ingreso, incluyendo los datos meteorológicos para el lugar, lo cual puede producir resultados de confiabilidad incierta para las condiciones peruanas. Estos análisis son más útiles para la comparación relativa de materiales de cobertura alternativos y su configuración, como lo ilustró Barton-Bridges y Robertson (1989). Un factor de complicación en la aplicación de esos análisis a los depósitos de relaves, es el efecto de roturas de la cobertura debido al largo plazo de asentamiento y consolidación, los cuales para los lodos pueden estar en el orden del 10% del espesor del depósito (Frechette, 1994).

Aunque se presentan como teóricamente efectivas, la construcción de coberturas secas sobre los depósitos de relaves presentan muchas dificultades prácticas. El proveer drenaje superficial positivo puede requerir tanto como varios metros de material sobre zonas de lamas del embalse, y la cobertura por sí misma requiere de una capa superficial para prevenir las rajaduras durante la desecación. La colocación del relleno de cobertura sobre los lodos puede requerir condiciones tediosas de construcción sobre terrenos blandos, usando mantas sintéticas y otros tejidos para acelerar la consolidación (Strachan, 1994; Strachan y Olenick, 1994; Miller y range, 1989; Frechette, 1994). El secado de la superficie del embalse, la ayuda más efectiva para la estabilización de la superficie, da oportunidad para la iniciación de la oxidación -justamente el proceso que se supone debe ser prevenido por la cobertura. Y, finalmente, la licuefacción sísmica de las lamas saturadas romperá, casi inevitablemente, la cobertura bajo las condiciones sísmicas prevaletientes en el Perú, aún en depósitos que son estables contra deslizamientos de gran escala. Aunque potencialmente muy convenientes para otros tipos de desechos generadores de ARD, las coberturas secas convencionales muestran claramente serios problemas teóricos y prácticos con respecto a los depósitos convencionales de relaves.

#### e) Coberturas Saturadas

Las coberturas saturadas buscan reducir la infiltración y difusión en los depósitos de relaves manteniendo la saturación en una capa superficial de material finamente dividido. Sin embargo, esto es hecho sin una cobertura de agua como tal - evitando así los problemas de estabilidad física de largo plazo asociados con la inmersión permanente, y mediante la deposición hidráulica en lugar de la colocación convencional de relleno - evitando así los problemas de construcción asociados con las coberturas secas. La descarga hidráulica de materiales de cobertura, finamente divididos, en vez de la colocación mecánica y compactación, proporciona la clave para la implementación práctica de las coberturas saturadas en los depósitos de relaves.

Aspectos teóricos del concepto han sido discutidos por Barbour (1990, Akindunni, et. al. 1991, y Nicholson, et. al. 1990), y estudios de campo en líneas similares han sido descritos por Dave, et. al. (1990b). El concepto tal como fue descrito originalmente por Nicholson et. al. (1989) es que el mercantil finamente dividido, como las lamas, retendrá una humedad permanente por capilaridad, proporcionando así una barrera al ingreso del oxígeno a los poros interiores de los relaves sulfurados. Las Lasma permanecen saturadas por muy largos períodos y aún en climas excepcionales secos, tal como ha sido confirmado por evidencias de campo a partir de embalses de relaves improductivos o inactivos (ver el Capítulo I). Por supuesto que este concepto requiere que por lo menos la capa cercana a la superficie de las lamas sea inmune a la oxidación de los sulfuros, y Nicholson et. al. (1989) propuso que los relaves cercanos al final de la vida de lamina sean liberados de pirita a fin de alcanzar este objetivo, o que las operaciones finales de la concentradora fueran conducidos con minerales bajos en pirita o aún con roca estéril, molida especialmente para este propósito. La remoción de area por cicloneo tambien puede ser necesaria para alcanzar el grano fino necesario.

En principio, la cobertura saturada proporcionará una solución efectiva y práctica a un costo menor que el de los otros métodos posibles de control de ARD. Una capa de lamas químicamente inertes, tan pequeña como 1-2 m. de espesor, puede ser suficiente, dependiendo de las condiciones climáticas. Las lamas son relativamente resistentes a la decantación y al agrietamiento por desecación y pueden ser depositados hidráulicamente bajo una cobertura operacional de agua, mediante tuberías de descarga de relave soportadas por pontones. Tal cobertura de lamas también tendrá la tendencia a sellarse por sí misma bajo la influencia de licuefacción sísmica, y los datos de rendimiento en el campo indican que la saturación de las lamas per-se no compromete la estabilidad sísmica del embalse durante el período de post -clausura. Las coberturas saturadas merecen una consideración especial para mitigar el ARD en los relaves del Perú, y de cualquier otro país.

## INFILTRACIONES

### Capítulo VII. CONTROL DE INFILTRACIONES DE LOS EMBALSES EN SUPERFICIE

#### 1. Requerimiento de Medidas de Control de la Infiltración

El que sea o no necesario aplicar medidas de ingeniería para reducir la infiltración de los embalses, depende principalmente de la naturaleza de los efluentes, del relave y de las características del agua subterránea que discurre debajo del embalse, y en una menor extensión de las características de permeabilidad del suelo natural y de la roca debajo de él.

Los efluentes cianurados procedentes de la concentración de plata y oro son de primera importancia. Otros tipos de relaves pueden ocasionar problemas especiales de contaminación de aguas subterráneas, relacionados con los constituyentes solubles, tales como el arsénico u otros metales, pero estos casos son relativamente raros. La calidad de los efluentes de los procesos ordinarios de flotación no requiere usualmente, de medidas extremas para la protección del agua del subsuelo, a no ser que el acuífero esté ubicado a poca profundidad debajo del embalse y que los pozos domésticos se ubiquen a poca distancia en el sentido de la gradiente.

La práctica común para el control de infiltraciones con relación al cianuro varía considerablemente. Los embalses de relaves de oro y plata que contienen cianuro son casi universalmente recubiertos interiormente (en el piso) en Norteamérica, pero la práctica reciente (1988) de los embalses en Australia no ha requerido de este recubrimiento, principalmente porque el agua del subsuelo tiene alta salinidad y no es utilizado para el consumo humano ni del ganado (Cooper, 1988). Muy pocos embalses de relaves de oro y plata en el Perú están protegidos interiormente en la actualidad, aunque algunos reúnen la infiltración del dique con los efluentes descargados, para proceder a la destrucción del cianuro antes de su descarga.

Existe evidencia de que el cianuro puede ser atenuado de manera natural hasta cierto grado y a medida que discurre a través de los suelos naturales (Rouse y Pyrih, 1991), pero la contaminación por cianuro, de aguas subterráneas, es todavía una preocupación potencial a no ser que el agua subterránea por debajo del embalse sea muy profunda (más de 100 metros), con una zona no saturada correspondientemente gruesa, como se da el caso en varias operaciones auríferas en el sur del Perú. En tales casos, la cantidad de infiltración que llega hasta el agua subterránea estará gobernada por los principios de flujo no saturados durante el período de operación del embalse (Mc Whorter y Nelson, 1977) y se requerirá un monitoreo de la calidad del agua. Durante el período de post-clausura, la infiltración es reducida drásticamente por la ausencia de agua retenida en la superficie

del depósito de relaves, y la infiltración a largo plazo debida a la infiltración de las escorrentías puede ser aceptablemente estimada utilizando el código HELP de computación discutido en el Capítulo VI (Schroeder, et. al., 1984).

## 2. Métodos Para el Control de la Infiltración

Las diversas medidas para el control de la infiltración que han sido utilizadas para los embalses de relaves incluyen desviaciones, revestimientos, sistemas de bombeo de retorno, recubrimientos sintéticos internos, y recubrimientos de suelo compactado. Fell (1990) proporciona un buen panorama de los actuales métodos y prácticas, los cuales son descritos en las siguientes secciones. Todo ellos dependen críticamente de los más altos niveles de control de calidad e inspección durante la construcción e instalación, y a menos que estos estándares sean mantenidos, los intentos de controlar la infiltración pueden ser un poco más que un gran desperdicio tanto de dinero como de esfuerzo. Es útil pensar en las medidas de control de la infiltración como la creación de una gran tina alrededor del depósito de relaves. Mediante esta analogía, es fácil comprender cómo una imperfección en un pequeño porcentaje del área total del embalse puede transmitir infiltración de igual manera como lo haría el drenaje de una tina.

### a) Barreras de Bloqueo y Canales de Colección

Las formas más comunes de controlar la infiltración son las barreras o diques y los canales a trincheras de colección los cuales son mas convenientes para condiciones de efluentes no críticos y de calidad del acuífero. Las barreras se incorporan por debajo del dique de arranque, usualmente como una zanja excavada y vuelta a llenar con relleno compactado de baja permeabilidad que conecta al corazón o núcleo del dique y, menos frecuentemente, usando la inyección de pulpa de cemento dentro de la roca fracturada. Las barreras sólo pueden ser efectivas si el cauce para la infiltración primaria es una capa de cimientos permeables muy bien definidos, de espesor limitado tal como un estrato de grava o una superficie de roca alterada por la intemperie. Muchas barreras no son efectivas debido a que no penetran totalmente el espesor de la zona permeable en la longitud total de la represa. Las barreras parciales son de poco valor.

Los canales colectores son simplemente trincheras de intersección localizadas en la base de la cara aguas abajo del dique, para recuperar la infiltración, de tal manera que pueda ser bombeada de vuelta a la represa o a la Planta.

Las trincheras recolectoras pueden ser excavadas a través de capas permeables, como en el caso de las barreras y también pueden captar infiltraciones que fluyen a través del dique. Los canales colectores son ampliamente utilizados para retornar el agua de las arenas, de los ciclones producidos durante la construcción de las presas de arenas cicloneadas.

#### b) Recubrimientos Sintéticos

Los materiales sintéticos se usan ampliamente para recubrir el piso de los embalses de relaves de cianuración de oro y plata, adoptando tecnología derivada de las operaciones de «heap leaching». Algunos de los materiales más comúnmente usados incluyen polietilenos de alta densidad (HDPE), polietilenos de muy baja densidad (VLDPE), cloruro de polivinilo (PVC) y polietileno clorosulfonado (Hypalón), éstos varían en cuanto a sus propiedades, requerimientos para su aplicación en el terreno, y necesidad de coberturas de protección. Todas, sin embargo, son químicamente compatibles con los efluentes típicos de relaves. Algunos ejemplos de diseño para embalses de relaves, recubiertos interiormente por material sintético, son dados por Kulesza (1991) y USCOLD (1989a).

Los diversos factores involucrados en la selección e instalación de esos materiales están fuera de los alcances de esta Guía pero son revisados en muchas partes (Koerner, 1990). Sin embargo, hay muchos requerimientos fundamentales que deben ser satisfechos por cualquier recubrimiento sintético de los embalses. Estos son:

- t El material debe ser de buena calidad y manufactura.
- t El recubrimiento no puede ser colocado sobre suelos naturales, blandos, sensitivos a la humedad o a la congelación.
- t El lecho debe ser cuidadosamente preparado para evitar la proyección de rocas y otros materiales que puedan perforar el recubrimiento.
- t Deben evitarse las tuberías u otros implementos que se proyectan a través del recubrimiento y que requieren de un sellado.
- t Para pegar/soldar en el campo los paneles individuales del recubrimiento debe contarse con supervisión experimentada,

utilizando procedimientos apropiados para el material de recubrimiento y teniendo en cuenta las condiciones de temperatura durante la instalación.

t La instalación de recubrimientos y su soldadura en el campo deben ser inspeccionadas, probadas y documentadas cuidadosamente.

La instalación del recubrimiento puede ser utilizada realizando labor sin mucha capacitación, siempre y cuando el personal esté apropiadamente entrenado. Sin embargo, aquellos que supervisen y dirigen

la operación deben tener experiencia en aplicaciones a gran escala con el material involucrado. La tecnología del recubrimiento sintético recién está siendo introducida en el Perú en algunas nuevas operaciones de «heap-leaching», de tal manera que la habilidad local para la instalación de los recubrimientos podrá estar disponible en el futuro.

Los recubrimientos sintéticos pueden afectar también al diseño y construcción de las represas de relaves, requiriendo usualmente que la inclinación de su talud «aguas arriba» sea inferior a 3H:1V. Debido a las dudas en la integridad de los recubrimientos, en relación con la instalación y el efecto de los terremotos, no debe confiarse en los recubrimientos sintéticos para el mantenimiento estructural de la represa. La represa debe ser diseñada como si los recubrimientos no estuvieran presentes, con taludes estables bajo las condiciones freáticas correspondientes, y con provisiones adecuadas de filtros internos y de drenaje.

#### c) Recubrimientos con Suelos

Los suelos arcillosos compactados pueden usarse para construir recubrimientos de embalses, si en el lugar hay suficiente cantidad de materiales adecuados. Algunos ejemplos típicos de recubrimientos de suelo compactado para embalses de relaves de cianuración de oro y plata han sido indicados por Skolasinski et. al. (1990) y USCOLD (1989b). Aunque la bentonita se encuentra en el Sur del Perú (Pisco), los suelos con agregado de bentonita no son muy adecuados para el Perú debido a la necesidad de transportarla en grandes cantidades y a través de grandes distancias.

En una mina en Chile y en otros lugares más, las lamas de oro y plata producidos por el proceso de deshidratación de relaves, están siendo compactados como un recubrimiento para otra parte de la operación. Sólo las lamas deshidratadas son adaptables para este propósito, porque el contenido de agua de las lamas ordinarias, hidráulicamente depositadas, es demasiado elevada para alcanzar una adecuada compactación y baja permeabilidad. Varios aditivos químicos para reducir la permeabilidad del suelo están disponibles en el mercado, pero hay poca experiencia sobre su efectividad para aplicarlos en los relaves debido a su alto costo.

La permeabilidad especificada para un recubrimiento preparado y compactado «in situ» debe ser menor de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cms/s con un espesor total de recubrimiento de cerca de 0.6 a 0.9 m, colocado y compactado en cuatro a seis capas sucesivas. Los tipos de suelo convenientes son descritos por Benson y Daniel (1994) y por Shelley y Daniel (1993). Como en el caso de los recubrimientos sintéticos, la obtención de una permeabilidad baja del recubrimiento con suelo depende casi enteramente del procedimiento adecuado de construcción e inspección. Daniel y Benson (1990) han descrito los efectos críticos del contenido de agua, densidad seca y esfuerzo de compactación, mientras que Benson y

Daniel (1990) y Kim y Daniel (1992) describen el efecto perjudicial de los grumos de suelos y del congelamiento sobre la permeabilidad del recubrimiento. Este también debe ser protegido de la desecación antes que sea inundado por los relaves, lo cual requiere que se le coloque una capa de suelo como cobertura, esta operación adicional incrementa notablemente el costo total del recubrimiento.

#### d) Sistemas de Recubrimiento

Los recubrimientos con suelo y sintéticos pueden ser combinados en configuraciones tipo «sandwich» que también pueden incluir capas de drenaje, de material permeable, para la detección de fugas. Varios de estos arreglos descritos por Peyton y Schroeder (1990), han sido desarrollados para cumplir con los estándares estrictos de la disposición de residuos peligrosos y de rellenos. Tales componentes de los recubrimientos múltiples incrementan la confiabilidad del recubrimiento. Sin embargo, los requerimientos de las coberturas de capas múltiples incrementan significativamente el costo y la dificultad en la construcción del recubrimiento, y no se adecúan específicamente a las características de los relaves (al contrario de los rellenos de desmonte) o a las condiciones en el Perú.

Los depósitos de lamas típicamente asociados con el tratamiento de oro y plata, pueden exhibir una permeabilidad vertical cercana a los 10<sup>-6</sup> cms/s si son depositados en forma tal que se reduzcan la segregación y formación de zonas arenosas interconectadas. Se puede mostrar fácilmente, por ejemplo, que un espesor de 6 m en los relaves tienen la misma capacidad para retardar la infiltración que un recubrimiento de suelo compactado de 0.6 m de espesor, con una permeabilidad de 10<sup>-7</sup> cms/s (Vick, 1990). Por lo tanto, un grado sustancial de protección contra la infiltración puede ser obtenido con los propios depósitos de relaves, si el procedimiento para la molienda y descarga de los relaves se controla cuidadosamente.

Las capas permeables que permiten detectar las fugas algunas veces incluidas entre las capas múltiples resultan ser de poca utilidad práctica, pues aún cuando la fuga en la cobertura es detectada, no hay forma posible de repararla, pues los relaves no pueden ser excavados y removidos para tener acceso a los puntos de fuga durante la operación del embalse. Únicamente con un embalse del tipo multi-celular puede sacarse de servicio una celda que tiene fuga e intentar su reparación. Por contraste, el monitoreo de la calidad del agua del subsuelo mediante pozos de monitoreo ubicados en la gradiente baja, puede darnos un aceptable nivel de seguridad para el recubrimiento de los embalses de relaves, sin la necesidad de intercalar capas permeables detectoras de escapes dentro del propio sistema de recubrimiento.

Finalmente, la complejidad de los sistemas de recubrimiento de multicomponentes pueden no ser apropiadas para el Perú en donde la alta calidad de sus métodos de construcción pueden ser muy difícil de alcanzar aún teniendo el tipo y tecnología de recubrimiento. Hablando en general, el concentrar los esfuerzos de control de calidad en un recubrimiento primario singular puede producir mejores resultados bajo las condiciones peruanas, que dispersar estos esfuerzos entre recubrimientos de diversos componentes.

#### e) Drenaje Subterráneo de Relaves

Una característica relacionada con las capas de drenaje dentro del propio sistema de recubrimiento es una capa de drenaje construida sobre el

recubrimiento y debajo de los relaves que han de ser descargados, a menudo mencionado como «el drenaje subterráneo de relaves», tal como son descritos por USCOLD (1984b) y Skolasinski, et. al. (1990). Los desagües subterráneos pueden tener tanto ventajas como desventajas, pero de cualquier manera redundan en un costo sustancial.

La razón principal para colocar un desagüe subterráneo es reducir la carga piezométrica sobre el recubrimiento y por lo tanto la infiltración a través de él. Esto puede reducir la cantidad de la infiltración, típicamente por un factor de 10 (Vick, 1990). Otro beneficio es el de acelerar el proceso relacionado con el drenaje, que parece ser un mecanismo esencial en el logro de la estabilidad sísmica posterior a la clausura, exhibida por los depósitos inactivos.

De otro lado, si los desagües subterráneos de-saturan las zonas de arena de los relaves , pueden acelerar la oxidación y la generación de ARD en los relaves sulfurados. Además, si existen gruesas imperfecciones en el recubrimiento, tal como rasgaduras en un recubrimiento sintético, la capa de drenaje puede prevenir que los relaves sellen el escape y convertir al recubrimiento en una vía para incrementar dicho escape en magnitudes que serían superiores a las que podrían alcanzarse de otra manera.

Cualquiera que sean sus ventajas o desventajas en una situación particular, la construcción de desagües subterráneos de acuerdo a la tecnología convencional orientada al relleno, es raramente exitosa en los embalses de relaves, debido a la incompatibilidad entre obturación y filtrado, entre el suelo de drenaje y la fracción más fina de las lamas depositadas directamente sobre él durante la descarga hidráulica de los relaves. No hay virtualmente suelo natural que pueda alcanzar los requerimientos de un filtro sin un procesamiento y lavado previos, que son económica y tecnológicamente impracticables para la operación minera, y sin embargo esto se olvida a menudo. Solamente suelos similares en gradación a las arenas cicloneadas pueden alcanzar compatibilidad de filtro, pero este material es raramente disponible con anterioridad al arranque del embalse que es cuando justamente se le necesita.

Una protección exitosa de filtrado para los desagües subterráneos de relaves usando «geofabric» han sido reportados por Gabler (1984), Skilasinski, et. al. (1990) y East (1990), y la protección con «geofabric» propiamente diseñada es necesaria para prevenir la obturación de los desagües subterráneos.

## REHABILITACION

### Capítulo VIII. REHABILITACION Y CIERRE DE DEPOSITOS SUPERFICIALES

El período de clausura se inicia cuando cesa la descarga de la concentradora al embalse y tiene una duración típica de 5 a 10 años, con el objeto de asegurar que se han tomado todas las medidas necesarias para la estabilidad física y química post-clausura, así como para asegurar su rendimiento. Cualquier modificación o ajuste necesario de estas medidas debe ser suficiente para alcanzar el «estado de abandono» de tal manera que los depósitos de relaves no requieran de posterior monitoreo, mantenimiento u operación, durante el período de post-clausura.

La estabilidad química de largo plazo está asociada principalmente con las medidas para controlar ARD , si esto es requerido , algunas de éstas

son descritas en el Capítulo VI y pueden ser puestas en práctica durante el período de clausura. De manera similar, la estabilidad total de la masa y la integridad a largo plazo contra derrumbes de relaves está asegurada por la eliminación de las acumulaciones de agua superficial en el embalse, por ejemplo, por una nivelación de la superficie y el uso permanente de desfogues como se discutió en el Capítulo 6. Debe quedar claro que ninguna de estas medidas puede ser una característica añadida solamente cuando el embalse va a finalizar sus operaciones. Por el contrario, un plan de clausura bien concebido, con la debida consideración de las medidas alternativas para la disposición de relaves y de los factores de ubicación del embalse, desde el mismo comienzo, sólo dejará pendiente medidas comparativamente simples para que sean implementadas durante el período de clausura.

El factor final a tener presente durante el período de clausura es la recuperación de la superficie o la protección de los depósitos de relaves contra los efectos erosionantes del viento y del agua.

### 1. Procesos y Efectos de la Erosión

El transporte erosivo de los relaves, más allá de los límites del depósito puede tener efectos ambientales sobre la calidad del agua superficial o sobre el «habitat» acuático por sedimentación en los arroyos o por la posible disolución ácida, a largo plazo, de metales. En algunos casos, la ingestión directa por los niños, de relaves desplazados conteniendo metales, como plomo, puede ser causa potencial de toxicidad crónica.

Como lo discutió Blight (1987), la erosión del agua afecta severamente los taludes del dique de relaves, en particular de aquéllos construidos con arenas de relaves cicloneados. El mecanismo de

erosión del agua ocurre por canalización y la manera más efectiva y económica para prevenirlo es cubriendo los taludes de relaves expuestos con una capa de suelo natural grueso, o desmonte de mina si éste está disponible y es químicamente inerte.

La erosión por viento es más importante en las grandes extensiones de la superficie del embalse. Las nubes de polvo provenientes de grandes embalses de relaves pueden elevarse miles de metros en la atmósfera, y los niveles de material particulado medidos cerca de los embalses pueden alcanzar valores como de 2000 mg por metro cúbico capaces de causar irritación de las vías respiratorias y constituir un riesgo a la seguridad de los vehículos en movimiento. En adición a los riesgos potenciales de ingestión directa de polvos de relaves con contenido metálico por parte de humanos y animales que se alimentan de pastos, éstos pueden también ser afectados no solamente por los metales sino por elementos tales como el fluor. Mientras que episodios severos de polvo de relaves tienden a ser cada vez menos frecuentes, aún en climas áridos, el potencial para la emisión de polvo puede ser visto como el principal impacto ambiental posterior a la clausura de los embalses de relaves. La severidad que se percibe en los impactos de polvo está a menudo relacionada directamente con la presencia de zonas residenciales y áreas adyacentes al embalse.

Teniendo en cuenta que se han llevado a cabo pocos estudios sobre el transporte por aire de los relaves como tales, se pueden utilizar los principios de una cantidad considerable de investigaciones sobre la erosión del viento en tierras agrícolas. Los primeros mecanismos de transporte de partículas son la variación brusca (saltación) y la suspensión. Las partículas de arena de un tamaño medianamente fino de 1.0 a

0.1 mm de diámetro, son objeto de «saltación» (variación brusca) ya que ellos se desprenden y son proyectados dentro de la corriente de aire, allí adquieren la velocidad dentro del viento y descienden para impactar contra la superficie causando otros movimientos de partículas. Las partículas sumamente finas (limos) menores de 0.1 mm de diámetro se mueven principalmente por «suspensión» y siguen la turbulencia del viento (Ciccone, et. al., 1987) . Aunque los más grandes flujos de masa ocurren por «saltación», es la suspensión la que produce las características «polvaredas» («dust blows») sobre la superficie de los embalses de relaves. Una importante interacción entre estos mecanismos ocurre cuando el proceso de saltación en cascada causa que las partículas finas de arena alcancen y produzcan salpicaduras de polvo sobre la superficie del limo, proyectando estas partículas al estado de suspensión (Gillette, 1976).

Debemos recordar también que los sulfuros de plomo, arsénico, fierro, etc. y, en general, los minerales más pesados, tienden a concentrarse en los tamaños más finos del relave y son por ello más susceptibles de arrastre cólico, tal como se muestra en las figuras 1.6 y 1.7 (C. Villachica, 1980).

Diversos factores que a menudo reducen el transporte de partículas en los suelos naturales parecen tener pequeño efecto sobre los relaves. Entre los más importantes está la formación de agregados estables de suelos, o terrones. Estos agregados son producidos por el cultivo y juntan partículas de varios tamaños, mayormente a través de las propiedades de cohesión y retención de humedad de las partículas de arcilla (menos de 0.002 mm) cuando al menos 15-20% de arcilla está presente (Chepil, 1953, 1955). La típica segregación por tamaño de partículas que ocurre en las playas de relaves y el bajo contenido de arcilla de la mayoría de los relaves de flotación, usualmente evitan la formación de agregados estables o costras en la superficie. En cambio, la mayoría de las superficies de los embalses, con algunas áreas que contienen predominantemente arenas y otras, principalmente lamas, tienen una alta susceptibilidad inherente al «salto» de las partículas de arena que entonces producen la suspensión de las lamas.

La humedad tiene efectos obvios sobre el transporte de partículas, pero únicamente dentro de pocos centímetros sobre la superficie de los relaves. El secado de la superficie no puede ser prevenido por la saturación debajo de la superficie, y las polvaredas han ocurrido en relaves finos saturados tan poco como a un metro por debajo de la superficie. El clima tiene efectos relacionados con la frecuencia y severidad de las polvaredas, pero los problemas de polvo de los relaves han sido informados en tan diversos climas como el cálido, condiciones secas del oeste de los Estados Unidos y las frías y húmedas condiciones de Irlanda. A este respecto, parece que la proximidad de los embalses a la población y la sensibilidad hacia los asuntos del polvo pueden ser importantes sobre la forma en que son percibidos los incidentes con polvo de los relaves. Los problemas de polvos de los relaves pueden ser reducidos por la cobertura con nieve y la unión interparticular con hielo en ambientes fríos, y en lugares elevados. De otro lado, hay informes aislados de problemas de polvo en la superficie de relaves finos, en climas más templados relacionados con la formación de agregados superficiales, frágiles, abiertos y altamente erosionables, como resultado del ablandamiento del hielo seguido por un secado por sublimación.

El principal objetivo de la recuperación de la superficie de los embalses es por lo tanto, prevenir la erosión de la superficie de los relaves por el viento, lo que puede ser logrado mediante varios procedimientos.

## 2. Medidas Para la Estabilización de la Superficie

Estabilizar la superficie del embalse requiere, primero, que el agua superficial del embalse sea drenada o se le permita evaporarse o que la superficie de los relaves se deje secar. La desecación de la superficie y la ganancia en resistencia, suficiente para soportar equipos, puede tomar de dos a tres estaciones secas, especialmente para las zonas de lamas. Aunque se han desarrollado métodos empíricos para predecir este tiempo de secado (Swarbrick y Fell, 1992), se deben practicar experiencias de campo para la mayoría de los depósitos de relaves individuales.

Durante o después del período de secado se puede obtener una estabilización temporal usando aditivos químicos, seguido por medidas permanentes que usan ya sea vegetación o cobertura con rocas, como será discutido en las siguientes secciones.

### a) Tratamiento Químico

Una variedad de técnicas han sido intentadas para el control del polvo de los relaves con efectividad y éxito variables.

El tratamiento químico de las superficies de los relaves ha sido realizado utilizando varios materiales diferentes, incluyendo emulsiones de petróleo, lignosulfonatos, polímeros, resimas, latex y cloruro de magnesio (Dean, et. al., 1974; Dean y Havens, 1970, 1971; Olson y Veith, 1987).

Los mejores resultados, con dosis de aplicación más baja parecen haberse obtenidos con relaves limpios, relativamente gruesos, tales como arenas cicloneadas. Sin embargo, los efectos son temporales y la reaplicación es requerida usualmente a intervalos que van de varias semanas a varios meses, a costos que en Estados Unidos varían de pocos cientos a pocos miles de dólares por acre, por estación. Este costo y las limitaciones de su efectividad, usualmente limitan la estabilización química de grandes áreas de relaves, excepto bajo circunstancias especiales tales como el cierre temporal de la concentradora. El tratamiento químico ha resultado muy útil en la estabilización temporal de las superficies sembradas durante la rehabilitación, y para estimular la germinación y supervivencia de las plantaciones, pero no puede servir como una medida permanente posterior a la clausura.

### b) Estabilización Vegetativa

Una cobertura vegetativa que se perpetúe a sí misma es el método preferido para la protección contra la erosión por largo tiempo de las superficies de los relaves. La revegetación de los relaves es un área altamente especializada de la agronomía que requiere bastante experiencia, tanto con los relaves como con las condiciones locales de cada asiento minero. Johnson y Putwain (1981) y Vick (1990) proporcionan los antecedentes generales de este tópico, y sólo unos pocos puntos son tratados aquí.

Pueden haber requerimientos conflictivos para el establecimiento de la vegetación. Por un lado, la necesidad de establecer inmediatamente una cobertura reclama el uso de especies importadas, no nativas (mayormente grass) con cobertura gruesa en la raíz, lo cual requiere una fuerte fertilización y a menudo irrigación. Sin embargo, la experiencia muestra que tales especies a menudo declinan en vigor cuando estas prácticas son discontinuadas. De otro lado, las especies nativas, especialmente aquellas que han desarrollado tolerancia por metales, se adaptan mejor a la supervivencia de largo plazo bajo condiciones locales, pero son difíciles de establecer en las superficies de relaves pobres en nutrientes que

no contienen micro-organismos que fijen el nitrógeno. Especialmente en áreas de grandes altitudes, los largos inviernos y las cortas estaciones de crecimiento limitan la descomposición de la materia orgánica por debajo del ciclo microbiano del nitrógeno. Sobre los últimos 20 años en el oeste de los Estados Unidos las especies que se adaptan en forma natural han sido cultivadas con el fin de crear stocks de semillas, las cuales están ahora disponibles comercialmente, y la importancia de cubrir los relaves con tierra de cultivo ha sido ampliamente aceptada (Colbert, 1991), especialmente donde las superficies de los relaves son favorables para la formación de ácidos.

Se ha observado por otro lado, que en dos concentradoras de la Costa Sur del país parte del agua de rebose del depósito de relaves es usado para irrigar huertos vecinos.

La exitosa revegetación de los relaves es todavía una propuesta de caso por caso, y en cada ejemplo se deben establecer áreas de vegetación y las pruebas, ser monitoreadas por lo menos 5 años antes del período de clausura. En el Perú, la rehabilitación de relaves es una experiencia que no está ampliamente disponible y la revegetación exitosa requerirá el desarrollo de técnicas y conocimientos agronómicos localmente convenientes. La limitada recuperación de playas de relaves usando tierras de cultivo en la Mina Casapalca, muestra que la revegetación a grandes altitudes es posible en el Perú. Establecida en 1984 con especies nativas transplantadas, la cobertura no se ha propagado mucho más allá del límite de la tierra de cultivo. La calidad del suelo del depósito de relaves con relación al contenido de metales y a la granulometría aceptables para el cultivo, puede ser adecuada mediante técnicas metalúrgicas específicas.

#### c) Cobertura con Roca

La recuperación vegetativa puede ser virtualmente imposible en algunas altas elevaciones o desiertos donde aún las plantas nativas no crecen. Bajo estas condiciones, el único recurso de estabilización puede ser cubrir las superficies de los relaves con fragmentos de rocas, desmonte minero o grava. Aún capas delgadas del tamaño de grava parecen reducir efectivamente la erosión sobre superficies relativamente planas (Chepil, 1963), reproduciendo eventualmente los llamados «desiertos pavimentados» que se encuentran en la naturaleza (Potter, 1992). Por ejemplo, Blight (1988) informa sobre una disminución en la erosión de 10 veces, en la superficie de relaves lamosos con taludes suaves, cubierta con una capa de «piedra muy fina» de 10 mm de tamaño y bajo condiciones climáticas del Sur de África. En las regiones más frías, donde la acción de congelación prevalece, las partículas más pequeñas resultarán sepultadas por los ciclos de congelación y deshielo en los relaves circundantes, requiriendo una capa más gruesa de fragmentos de roca, semejantes al talud detrítico encontrado en muchos lugares elevados.

## RESUMEN

### Capítulo IX. RESUMEN Y RECOMENDACIONES

Como un soporte técnico y documento de referencia, esta Guía para el Manejo de Relaves de Mina y Concentradora ha intentado explicar los temas, problemas, y soluciones del manejo de relaves, tratando inicialmente los principios básicos y efectuando el recorrido hasta la tecnología

avanzada en actual uso. Debido a que la Guía está orientada a una audiencia muy amplia, con diversos intereses técnicos, niveles de experiencia y puntos de vista, es conveniente resumir los principales temas presentados con el objeto de establecer su prioridad y significación.

Tal resumen debe comenzar con las prácticas de relaves en uso en el Perú. Esta Guía no puede tratar los problemas específicos y soluciones en las minas existentes, lo cual requiere investigaciones detalladas y ajustadas a las circunstancias únicas de cada caso. Sin embargo, las prácticas existentes proporcionan los fundamentos sobre los cuales el manejo de relaves en el Perú evolucionará a lo largo del tiempo a los niveles más avanzados de la práctica internacional, junto con adaptaciones para cumplir los desafíos especiales del manejo de relaves en el país. Ciertamente que el manejo de relaves en el Perú es más difícil que en cualquier otro país del mundo debido a sus condiciones extremas en topografía, clima y riesgo sísmico, agregado a la prevalencia de cuerpos mineralizados altamente sulfurados y a los problemas de contaminación por drenaje ácido (ARD) que ellos poseen.

Cualquier esfuerzo sistemático para mejorar las prácticas actuales debe considerar el objetivo básico de alcanzar la estabilidad física de los depósitos de relaves y minimizar la contaminación química, tanto durante la operación como mucho después de su clausura. Además estos objetivos deben ser alcanzados en forma que no requiere operaciones de largo plazo hacia la industria minera y recargadas responsabilidades al gobierno. Mientras que las preocupaciones ambientales tales como los efectos de la contaminación sobre las aguas subterráneas y la vida acuática deben ser ampliamente conocidas y tratadas, los asuntos más urgentes del manejo de relaves en el Perú están directamente relacionadas con la seguridad humana y la salud, específicamente los riesgos a la seguridad derivados de las fallas de las represas de relaves y los riesgos para la salud por la directa ingestión de metales en el agua de relaves o por partículas en suspensión en el aire.

EL primer paso hacia la mejora de las prácticas corrientes es discontinuar la descarga directa de relaves a los ríos, así como la descarga controlada y sin monitoreo de relaves a las playas del océano y a los lagos naturales. Mientras que la descarga de relaves en las profundidades de las aguas del océano y lagos es practicada en muchas partes bajo condiciones de muy estrecho control y podrían ser aceptables bajo circunstancias específicas en el Perú, tales operaciones son intensamente monitoreadas para asegurar que los efectos químicos y biológicos estén restringidos en magnitud y ubicación, y que estos efectos sean muy bien comprendidos. En el Perú las condiciones oceanográficas con respecto a corrientes marinas fuertes y ausencia de bahías cerradas como en otras latitudes prescribe la deposición subterránea de relaves.

En el siguiente nivel de desarrollo están las prácticas relativas a la ubicación, diseño y operación de represas y embalses superficiales de relaves. Aquí la más imperiosa necesidad es por la aplicación de los principios básicos de ingeniería y conocimiento de la conducta de las represas de relaves, para asegurar la seguridad de estas estructuras. Notablemente ausente en la práctica peruana está el diseño para eventos extremos (inundaciones y terremotos) ya sea para las condiciones operacionales o de post-clausura. La buena práctica de ingeniería en este asunto prescribe definitivamente el empleo de represas de relaves del tipo "aguas-arriba" y exige un diseño sísmico, riguroso y prácticas de construcción que incluyen la remoción de suelos susceptibles a la licuefacción de los cimientos de las represas y la compactación de los

materiales de relleno de la misma. Igualmente importante es la ubicación de los nuevos embalses; y puede ser muy difícil predecir con fiabilidad y diseñar embalses de relaves para las condiciones extremas de inundación en el Perú, y puede ser imposible desde un punto de vista práctico proporcionar protección de ingeniería contra algunos de los más serios y frecuentes riesgos naturales, como son las corrientes de lodos y rocas llamadas huaycos. Evitar las ubicaciones de embalses y esquemas donde estos problemas ocurren es claramente la mejor y tal vez la única solución realista. Una necesidad adicional es la de implementar uniformemente la recirculación de agua del proceso, desde el depósito de relave hacia la concentradora, esta es una práctica cuya amplia ausencia en el Perú contribuye, considerablemente a la contaminación de las aguas superficiales por metales al punto que varios de los puntos principales reportan altos niveles de contaminación.

Todas las medidas resumidas hasta aquí involucran tecnología bien desarrollada sobre manejo de relaves, cuya aplicación, aunque complicada por las condiciones en el Perú, es razonablemente directa. El manejo de relaves en el Perú en forma realmente efectiva y económica, requerirá sin embargo, avances más allá de las técnicas estándares hacia tecnologías y estrategias de manejo de relaves menos convencionales, específicamente adaptadas a los desafíos de la minería peruana y sus condiciones de procesamiento. El principal de estos desafíos lo constituyen los problemas y oportunidades presentadas por las minas subterráneas en los Andes, donde la factibilidad de desarrollar presas de relaves convencionales con un grado aceptable de seguridad operacional y post-clausura puede estar severamente restringidos.

Varios métodos alternativos, sean solos o en combinación, serán necesarios en estos casos. Especialmente útil es la práctica de rellenar las labores mineras subterráneas con relaves, sea usando cemento como un agente estabilizador o utilizando el cicloneo para separar y retornar solamente la fracción libre de arena.

También tiene gran potencial el uso de varios dispositivos de filtración en la concentradora para deshidratar parcialmente los relaves, los cuales pueden ser colocados y compactados mecánicamente en apilamientos configurados en forma semejante a las acumulaciones de desmonte de mina, con seguridad permanente contra la inestabilidad física causada por las inundaciones y terremotos.

En forma similar se requerirán innovaciones para desarrollar respuestas peruanas a los problemas de ARD tanto para operaciones de subsuelo como en las grandes operaciones a tajo abierto. Los asuntos de ARD relacionados con los relaves han sido bien desarrollados o no han producido soluciones universales aplicables, y continúa la investigación internacional. Sin lugar a dudas, algunos asuntos tales como la colocación permanente de relaves bajo el agua no son adaptables a las condiciones peruanas, mientras que otros, como la flotación de pirita, junto con el relleno del subsuelo o la disposición separada de concentrados de pirita pueden ser ideales. Otros conceptos emergentes, tal como la cobertura con lamas saturadas, parecen prometedores y el Perú puede muy bien encontrarse en la primera línea de aplicación de éste y otros métodos.

El nivel de tecnología requerido para construir este escenario de desarrollo progresivo requiere de especialistas en diferentes campos de la ingeniería y la ciencia, que tengan experiencia tanto en el tema de relaves como un conocimiento profundo de las condiciones peruanas. Para

alcanzar las innovaciones necesarias se requerirá, si no de nueva tecnología, por lo menos de un alejamiento de los enfoques convencionales de planificación, para integrar el manejo de relaves a un nivel igual al de la producción tradicional de la mina y los procesos metalúrgicos concernientes. Esperamos que el lector haya encontrado esta Guía como un paso útil en esa dirección.

## REFERENCIAS

Abadjiev, C., 1985, «Estimation of Physical Characteristics of Deposited Tailings in the Dam of Nonferrous Metallurgy,» Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., San Francisco.

Agricola, G., 1556, *De Re Metallica*, H. Hoover and L. Hoover (trans.), Dover Publications, New York.

Akindunni, F., Gillham, R., and Nicholson, R., 1991, «Numerical Simulations to Investigate Moisture-Retention Characteristics in the Design of Oxygen-Limiting Covers for Reactive Mine Tailings,» *Canadian Geotech. Journ.*, v. 28.

Altringer, P., Lien, R., and Gardner, K., 1991, «Biological and Chemical Selenium Removal from Precious Metal Solutions,» *Environmental Management for the 1990's*, D. Lootens, et. al., (eds.), Soc. for Mining, Met. and Exp., Littleton, Colorado.

Alva, J., Meneses, J., and Guzmán, V., 1985, «Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Peru,» *Simposio Sobre el Peligro y Riesgo Sísmico y Volcánico en América del Sur*, v. 14, CERESIS, San Juan, Argentina.

Alva, J. and Parra, D., 1991, «Evaluación del Potencial de Licuación de Suelos en Chimbote, Peru,» Proc. 9th Panamerican Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., Viña del Mar.

Baer, R., Sherman, G., and Plumb, P., 1992, «Submarine Disposal of Mill Tailings from On-Land Sources - An Overview and Bibliography, OFR 89-92, U.S. Bureau of Mines Alaska Field Operations Center, Juneau.

Barbour, S., 1990, discussion: «Reduction of Acid Generation in Mine Tailings Through the Use of Moisture-Retaining Cover Layers as Oxygen Barriers,» *Canadian Geotech. Journ.*, v. 27.

Barton-Bridges, J., and Robertson, A., 1989, «Geotechnical Considerations in the Control of Acid Mine Drainage,» *Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage*, Vancouver Geotech. Soc.

Bennett, J., Harries, J., and Ritchie, A., 1988, «Rehabilitation of Waste Rock Dumps at the Rum Jungle Mine Site,» *Mine Drainage and Surface Mine Reclamation*, v. 1: Mine Water and Mine Waste, IC 9183, U.S. Bureau of Mines.

Benson, C., and Daniel, D., 1990, «Influence of Clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay,» *Journ. Geotech. Eng., ASCE*, v. 116, no. 8.

- Benson, C., and Daniel, D., 1994, «Minimum Thickness of Compacted Soil Liners: II Analysis and Case Histories,» *Journ. Geotech. Eng., ASCE*, v. 120, no. 1.
- Berti, G., Villa, F., Dovera, D., Genevois, R., and Brauns, J., 1988, «The Disaster at Stava/Northern Italy», *Hydraulic Fill Structures*, D. Van Zyl and S. Vick (eds.), *Geotech. Spec. Pub. No. 21*, ASCE.
- Bishop, A., «The Stability of Tips and Spoil Heaps,» *Quart. Journ. Eng. Geol.*, v.6.
- Blight, G., 1987, «Erosion of the Slopes of Gold Tailings Dams,» *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*,» R. Woods (ed.), *Geotech. Spec. Pub. No. 13*, ASCE.
- Blight, G., 1988, «Some Less Familiar Aspects of Hydraulic Fill Structures,» D. Van Zyl and S. Vick (eds.), *Geotech. Spec. Pub. No. 21*, ASCE.
- Blight, G., and Steffen, O., 1979, «Geotechnics of Gold Mine Waste Disposal,» *Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal*, ASCE.
- Boldt, C., 1985, «Compaction Criteria for Metal and Nonmetal Tailings,» RI 8921, U.S Bureau of Mines.
- Boldt, C., 1988, «Beach Characteristics of Mine Waste Tailings», RI 9171, U.S. Bureau of Mines
- Brawner, C., 1979, «Design, Construction, and Repair of Tailings Dams for Metal Mine Waste Disposal,» *Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal*, ASCE.
- British Columbia Acid Mine Drainage Task Force, 1989, *Draft Acid Drainage Technical Guide*, (BiTech Publishers, Vancouver).
- Broughton, S., 1992, «Documentation and Evaluation of Mine Dump Failures for Mines in British Columbia,» contract report 91-114, B.C. Ministry of Energy, Mines, and Pet. Res., Victoria.
- Casaverde, L., and Vargas, J., 1985, «Riesgo Sísmico del Perú,» *Simposio Sobre el Peligro y Riesgo Sísmico y Volcánico en América del Sur*, v. 14, CERESIS, San Juan, Argentina.
- Cassidy, J., and Hui, S., 1990, «Flood Criteria and the Safety of Tailings Dams,» *Proc. Int. Symp. on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams*, Australian Nat. Committee on Large Dams, Sydney, (BiTech Publishers, Vancouver).
- Chepil, W., 1953, «Factors That Influence Clod Structure and Erodibility of Soil By Wind: I. Soil Texture,» *Soil Science*, v. 73.
- Chepil, W., 1955, «Factors That Influence Clod Structure and Erodibility of Soil By Wind: IV. Sand, Silt, and Clay,» *Soil Science*, v. 80.
- Chepil, W., Woodruff, N., Siddoway, F., Fryrear, D., and Armburst, D., 1963, «Vegetative and Nonvegetative Materials to Control Wind and Water Erosion,» *Proc. Soil Science of Am.*, v. 27.
- Chowdhury, D., and Whiteman, S., 1987, «Structure of the Benioff Zone Under Southern Peru to Central Chile,» *Tectonophysics*, v. 134.
- Ciccone, A., Kawall, J., and Keffer, J., 1987, «An Experimental Investigation of a Wind-Generated Suspension of Particulate Matter from a

Tailings Disposal Area,» *Boundary-Layer Meteorology*, v. 38.

Colbert, T., 1991, «Reclamation of Acid-Forming Tailing in the Western U.S. - Good News at Last,» *Environmental Management for the 1990's*,» D. Lootens, et. al., (eds.), Soc. for Mining, Met. and Exp., Littleton, Colorado.

Conlin, B., 1989, «Tailings Beach Slopes,» *Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage*, Vancouver Geotech. Soc.

Cooper, D., 1988, «Tailings Management Practice in Australia,» *Hydraulic Fill Structures*, D. Van Zyl and S. Vick (eds.), Geotech. Spec. Pub. No. 21, ASCE.

Daniel, D., and Benson, C., 1990, «Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners,» *Journ. Geotech. Eng., ASCE*, v. 116, no. 12.

Dave, N., Lim, T., and Chakravatti, J., 1990, «Hydrogeochemical Evolution of an Experimental Thickened Tailings Pile of Pyritic Uranium Tailings,» *Acid Mine Drainage - Designing for Closure*, J. Gadsby, et. al., (eds.), BiTech Publishers, Vancouver.

Dave, N., Lim, T., Vivyurka, A., Bihari, B., and Kay, D., 1990b, «Development of Wet Barriers on Pyritic Uranium Tailings, Elliot Lake Ontario: Phase I,» *Acid Mine Drainage - Designing for Closure*, J. Gadsby, et. al., (eds.), BiTech Publishers, Vancouver.

Dawson, R., Morgenstern, N., and Gu, W., 1992, «Instability Mechanisms Initiating Flow Failures in Mountainous Mine Waster Dumps, Phase I,» CANMET, Ottawa.

Dean, K., and Havens, R., 1971, «Stabilizing Mineral Wastes,» *E/MJ*, April.

Dean, K., Havens, R., and Glantz, M., 1974, *Methods and Costs for Stabilizing Fine-Sized Mineral Wastes*, RI 7896, U.S. Bureau of Mines.

Dean, K., and Havens, R., 1970, «Stabilization of Mineral Wastes from Processing Plants,» *Proc. Second Mineral Waste Utilization Symp., U.S. Bureau of Mines and IIT Res. Inst., Chicago, Illinois*.

DGAS, 1992, «Estudio Básico Situacional de los Recursos Hídricos del Perú,» Dirección General de Aguas y Suelos, Lima, Junio.

Dobry, R., and Alvarez, L., 1967, «Seismic Failures of Chilean Tailings Dams,» *Journ. Soil Mech. Fdn. Eng., ASCE*, v. 93, no. SM6.

Domville, S., and Henry, G., 1992, «Improved Process for Treatment of Mill Effluent Containing Arsenic and Cyanide,» *Vancouver '92*, Randol.

Dorbath, L., Cisternas, A., and Dorbath, C., 1990, «Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru,» *Bull. Seis. Soc. of Am.*, v. 80, no. 3.

East, D., 1990, «Performance Achievements of Drained Managed Tailings Storage Facilities,» *Mining and Mineral Processing Wastes*, F. Doyle (ed.), Soc. for Mining, Met. and Exp., Littleton, Colorado.

Eckersley, D., 1990, «Instrumented Laboratory Flowslides,» *Geotechnique*, v. 40, No. 3.

Edwards, R., «Seismic Behavior of `Los Leones' Tailings Dam,» *Proc. Int. Symp. on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams*, Australian Nat.

Committee on Large Dams, Sydney, (BiTech Publishers, Vancouver).

ENR, 1937, «Mine Tailings Slide Destroying Town,» Engineering News-Record, June 3.

Espinosa, A., Casaverde, L., Michael, J., Alva, J., and Vargas, J., 1985, «Earthquake Catalog of Peru,» open-file report 85-286, U.S. Geol. Survey.

Fell, R., 1990, «Seepage Control Measures in Tailings Dams,» Proc. Int. Symp. on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, Australian Nat. Committee on Large Dams, Sydney, (BiTech Publishers, Vancouver).

Finn, W., Yogendrakumar, H., Lo, R., and Ledbetter, R., 1990, «Seismic Response Analysis of Tailings Dams,» Proc. Int. Symp. on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, Australian Nat. Committee on Large Dams, Sydney, (BiTech Publishers, Vancouver).

Frechette, R., 1994, «Construction of Access Ramps and Reclamation Covers Upon Tailings Impoundment Surfaces,» Tailings and Mine Waste '94, Balkema, Rotterdam.

Fourie, A., 1988, «Beaching and Permeability Properties of Tailings,» Hydraulic Fill Structures, D. Van Zyl and S. Vick (eds.), Geotech. Spec. Pub. No. 21, ASCE.

Gabler, R., 1984, «Properties of Filter Cloths for Seepage Control in Coal Mine Waste Embankments,» RI 8871, U.S. Bureau of Mines.

Gillette, D., 1976, «Fine Particulate Emissions Due to Wind Erosion,» Am. Soc. of Agricultural Eng., Annual Meeting, Lincoln, Neb.

Griffin, P., 1990, «Control of Seepage in Tailings Dams,» Proc. Int. Symp. on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, Australian Nat. Committee on Large Dams, Sydney, (BiTech Publishers, Vancouver).

Howe, R., 1984, «The Presence of Cyanides in Nature,» Cyanide and the Environment, D. Van Zyl (ed.), Colorado State Univ., (BiTech Publishers, Vancouver).

ICOLD, 1989, «Tailings Dam Safety Guidelines,» Bulletin 74, Committee on Mine and Industrial Tailings Dams, Int. Commission on Large Dams, Paris.

Jennings, J., 1979, «The Failure of a Slimes Dam at Bafokeng, Mechanisms of Failure and Associated Design Considerations,» The Civil Engineer in South Africa, June.

Jeyapalan, J., 1982, «Earthquake Induced Movements of Thickened Tailings Slopes,» Dynamic Stability of Tailings Dams, ASCE National Convention, preprint 82-539, New Orleans.

Johnson, M., and Putwain, P., 1981, «Restoration of Native Biotic Communities on Land Disturbed by Metalliferous Mining,» Minerals and the Environment, v. 3, no. 3.

Keefer, D., 1984, «Landslides Caused by Earthquakes,» Geol. Soc. of Am. Bull., v. 95.

Kim, W., and Daniel, D., 1992, «Effects of Freezing on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 118, no. 7.

- Klohn, E., 1979, «Seepage Control for Tailings Dams,» Mine Drainage, G. Argall and C. Brawner (eds.), Miller Freeman, San Francisco.
- Klohn, E., and Maartman, C., 1972, «Construction of Sound Tailings Dams by Cycloning and Spigotting,» Tailing Disposal Today, C. Alpin and G. Argall (eds.), Miller Freeman, San Francisco.
- Knight, B., and Haile, J., 1983, «Sub-aerial Tailings Deposition with Underdrainage,» Proc. 7th Panamerican Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., Vancouver.
- Koerner, R., 1990, Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Krause, E., 1992, «Arsenic Removal at INCO's CRED Plant and Disposal Practice,» Proc. Arsenic Workshop, EPA Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Kulesza, R., 1991, «Use of Geosynthetic Materials in Dams by Bechtel Corporation,» Use of Geosynthetic Materials in Dams, 11th Ann. USCOLD Lecture Series, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
- Kupper, A., Morgenstern, N., and Segó, D., 1992a, «Laboratory Tests to Study Hydraulic Fill,» Canadian Geotech. Jour., v. 29.
- Kupper, A., Morgenstern, N., and Segó, D., 1992b, «Comparison Between Flume Tests Used for Hydraulic Fill Studies,» Canadian Geotech. Jour., v. 29.
- Ladd, C., 1991, «Stability Evaluation During Staged Construction,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 117, no. 4.
- Lefebvre, G., and Dastous, A., 1991, «Beach Characteristics of Tailings Ponds,» Proc. 9th Panamerican Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., Viña del Mar.
- Lighthall, P., «Innovative Tailings Disposal Methods in Canada,» Int. Journ. Surface Mining, v. 1.
- Lighthall, P., Watts, B., and Rice, S., 1989, «Deposition Methods for Construction of Hydraulic Fill Tailings Dams,» Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage, Vancouver Geotech. Soc.
- Lo, R., and Klohn, E., 1990, «Seismic Stability of Tailings Dams,» Proc. Int. Symp. on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, Australian Nat. Committee on Large Dams, Sydney, (BiTech Publishers, Vancouver).
- Lucia, P., 1981, «Review of Experiences with Flow Failures of Tailings Dams and Waste Impoundments,» Ph.D. thesis, Univ. of California, Berkeley.
- Lucia, P., Duncan, M., and Seed, H., 1981, «Summary of Research on Case Histories of Flow Failures of Mine Tailings Impoundments,» Mine Waste Disposal Technology, IC 8857, U.S. Bureau of Mines.
- Makdisi, F., and Seed, H., «Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-Induced Deformations,» Journ. Geotech. Eng. Div., ASCE, v. 104, no. GT7.
- Marcusen, W., Hynes, M., and Franklin, G., 1990, «Evaluation and Use of Residual Strength in Seismic Safety Analysis of Embankments,»

Earthquake Spectra, v. 6, no. 3.

Marr, A., 1983, discussion: «Seepage from Free Water Above Impermeable Tailings,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 109, no. 1.

Martcorena, D., 1991, «Importancia de la Microzonificación de Riesgos Para Prevenir Proceso Geodinámicos Externos,» Proc. 9th Panamerican Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., Viña del Mar.

Meigs, P., 1966, Geography of Coastal Deserts, UNESCO.

Miller, L., and Range, D., 1989, «The Use of Vertical Band Drains (Wicks) to Accelerate Consolidation of Uranium Tailings,» Geotechnical News, September.

Morgenstern, N., 1985, «Geotechnical Aspects of Environmental Control,» Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., San Francisco.

Nicholson, R., Gillham, R., Cherry, J., and Reardon, E., 1989, «Reduction of Acid Generation in Mine Tailings Through the Use of Moisture-Retaining Cover Layers as Oxygen Barriers,» Canadian Geotech. Journ., v. 26.

Nicholson, R., Gillham, R., Cherry, J., and Reardon, E., 1990, reply: «Reduction of Acid Generation in Mine Tailings Through the Use of Moisture-

Retaining Cover Layers as Oxygen Barriers,» Canadian Geotech. Journ., v. 27.

Nishenko, S., 1985, «Seismic Potential for Large and Great Interplate Earthquakes Along the Chilean and Southern Peruvian Margins of South America: A Quantitative Reappraisal,» Journ. Geophys. Res., v. 90, no. B5.

NRC, 1985a, Liquefaction of Soils During Earthquakes, Nat. Res. Council, National Academy Press, Wash. D.C.

NRC, 1985b, Safety of Dams, Flood and Earthquake Criteria, Nat. Res. Council, National Academy Press, Wash. D.C.

Olson, K., and Veith, D., 1987, Fugitive Dust Control for Haulage Roads and Tailings Basins, RI 9067, U.S. Bureau of Mines.

ONERN, 1986, «Perfil Ambiental del Perú,» Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Agencia para Desarrollo International AID, Mayo.

Parrish, C., «Environmental Compliance Costs in Mining,» Environmental Management for the 1990's,» D. Lootens, et. al., (eds.), Soc. for Mining, Met. and Exp., Littleton, Colorado.

Pedersen, T., Mueller, B., and Pelletier, C., 1990, «On the Reactivity of Submerged Mine Tailings in Fjords and a Lake in British Colombia,» Acid Mine Drainage - Designing for Closure, J. Gadsby, et. al., (eds.), BiTech Publishers, Vancouver.

Peyton, R., and Schroeder, P., 1990, «Evaluation of Landfill-Liner Designs,» Journ. Environmental Eng., ASCE, v. 116, no. 3.

Poling, G., and Ellis, D., (eds.), 1993, «Case Studies of Submarine Tailings Disposal: Volume I - North American Examples,» U.S. Bureau of Mines Alaska Field Operations Center, Juneau.

Potter, L., 1992, «Desert Characteristics as Related to Waste Disposal,» Deserts as Dumps?, C. Reith and B. Thomson (eds.), Univ. of New Mexico Press, Albuquerque.

Poulos, S., Robinsky, E., and Keller, T., 1985, «Liquefaction Resistance of Thickened Tailings,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 111, no. 12.

Proceedings Int. Symp. on Flow-Through Rock Drains, 1986, Technical and Research Committee on Reclamation, BiTech Publishers, Vancouver.

Robinsky, E., Barbour, S., Wilson, G., Bordin, D., and Fredlund, D., 1991, «Thickened Sloped Tailings Disposal - An Evaluation of Seepage and Abatement of Acid Drainage,» 2nd Int. Conf. on the Abatement of Acid Drainage, Montreal.

Robinsky, E., 1979, «Tailings Disposal by the Thickened Discharge Method for Improved Economy and Environmental Control,» Tailing Disposal Today, G. Argall (ed.), Miller Freeman, San Francisco.

Rouse, J., and Pyrih, R., 1991, «Geochemical Attenuation and Natural Biodegradation of Cyanide Compounds in the Subsurface,» Environmental Management for the 1990's,» D. Lootens, et. al., (eds.), Soc. for Mining, Met. and Exp., Littleton, Colorado.

Schroeder, P., Gibson, A., and Smolen, M., 1984, «The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model,» EPA/530-SW-84-009 and 010, U.S. Environmental Protection Agency.

Scott, J., 1984, «An Overview of Cyanide Treatment Methods for Gold Mill Effluents,» Cyanide and the Environment, D. Van Zyl (ed.), Colorado State Univ., (BiTech Publishers, Vancouver).

Sebrier, M, Mercier, J., Megard, F., Laubacher, G., and Carey-Gailhardis, E., 1985, «Quaternary Normal and Reverse Faulting and the State of Stress in the Central Andes of South Peru,» Tectonics, v. 4, no. 7.

Seed, H., 1987, «Design Problems in Soil Liquefaction,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 113, no. 8.

Seed, H., Makdisi, F., and de Alba, P., 1978, «Performance of Earth Dams During Earthquakes,» Journ. Geotech. Eng. Div., ASCE, v. 104, no. GT7.

Seed, H., Tokimatsu, K., Harder, L., and Chung, R., 1985, «Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 111, no. 12.

Seed, R., and Harder, L., 1990, «SPT-Based Analysis of Cyclic Pore Pressure Generation and Undrained Residual Strength,» Proc. H. Bolton Seed Mem. Symp., v. 2, BiTech Publishers, Vancouver.

Sharma, S., and Candia, M., 1992, «Seismic Hazard Analysis in Peru,» Engineering Geology, v. 32.

Shelley, T., and Daniel, D., 1993, «Effects of Gravel on Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 119, no. 1.

Simovic, L., Snodgrass, W., Murphy, K., and Schmidt, J., 1984, «Development of a Model to Describe the Natural Degradation of Cyanide in Gold Mill Effluents,» Cyanide and the Environment, D. Van Zyl (ed.), Colorado State Univ., (BiTech Publishers, Vancouver).

Skolasinski, D., Haile, J., and Smith, A., 1990, «Design Objectives and Performance of the Tailings Management System for the Jamestown Mine, California,» Mining and Mineral Processing Wastes, F. Doyle (ed.), Soc. for Mining, Met. and Exp., Littleton, Colorado.

Stewart, B., Lambeth, R., and Williams, B., 1990, «Effects of Pyritic Tailings in an Abandoned Impoundment on Downgradient Water Quality,» Mining and Mineral Processing Wastes, F. Doyle (ed.), Soc. for Mining, Met. and Exp., Littleton, Colorado.

Strachan, C., and Olenick, C., 1994, «Design and Construction of the Closure Plan for the Conquista Uranium Mill Tailings Impoundment,» Proc. 1st Int. Conf. on Environmental Geotechnics, Edmonton, Alberta (in press).

Strachan, C., 1994, «Covering Tailings - Some Theoretical and Practical Aspects,» Tailings and Mine Waste '94, Balkema, Rotterdam.

Swaigood, J., «Historical Behavior of Embankment Dams During Earthquakes,» Assn. of State Dam Safety Officials Ann. Conf., Kansas City, Missouri.

Swarbrick, G., and Fell, R., 1992, «Modeling Desiccating Behavior of Mine Tailings,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 118, no. 4.

Toran, L. and Bradbury, K., 1985, «Hydrogeological and Geochemical Evolution of Contaminated Groundwater Near Abandoned Mines,» Tech. Report Proj. No. G-878-03, Univ. of Wisconsin Water Res. Center, Madison.

Trifunac, M., and Brady, A., 1975, «On the Correlation of Seismic Intensity Scales with Peaks of Recorded Strong Ground Motion,» Bull. Seis. Soc. of Am., v. 65.

Troncoso, J., 1990, «Failure Risks of Abandoned Tailings Dams,» Proc. Int. Symp. on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, Australian Nat. Committee on Large Dams, Sydney, (BiTech Publishers, Vancouver).

Twidwell, L., Plessas, K., and Bowler, T., 1994, «Removal of Arsenic from Wastewaters and Stabilization of Arsenic Bearing Waste Solids,» J. Hazardous Materials, v. 36.

USCOLD, 1989a, «McCoy Mine Tailings Dam,» USCOLD Newsletter, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.

USCOLD, 1989b, «Newmont's No. 4 Mill Tailings Dam,» USCOLD Newsletter, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.

USCOLD, 1992, «Observed Performance of Dams During Earthquakes,» Committee on Earthquakes, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.

USCOLD, 1994, «Tailings Dam Incidents,» Committee on Tailings Dams, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.

Velarde, J., Pyke, R., and Beike, M., 1983, «Design of an Embankment to Retain Gold Tailings,» Proc. 7th Panamerican Conf. Soil Mech. Fdn.

Eng., Vancouver.

Vick, S., 1990, Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams, BiTech Publishers, Vancouver.

Vick, S., 1991, «Inundation Risk from Tailings Dam Flow Failures,» Proc. 9th Panamerican Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., Viña del Mar.

Vick, S., 1992, discussion: «Stability Evaluation During Staged Construction,» Journ. Geotech. Eng., ASCE, v. 118, no. 8.

Vick, S., Dorey, R., Finn, W., and Adams, R., 1993, «Seismic Stabilization of St. Joe State Park Tailings Dams,» Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, L. Anderson (ed.), Geotech. Spec. Pub. No. 35, ASCE.

Villachica, C., 1979, «Alternativa de Transporte y Disposición de Relaves de la Concentradora de Casapalca,» Dpto. de Investigaciones Metalúrgicas, Centromín, Perú.

Villachica, C., 1981, «Modernización y Racionalización de la Concentración de Minerales Polimetálicos en las Concentradores de Centromín Peru,» Dpto. de Investigaciones Metalúrgicas, Centromín, Peru.

Villachica, C., 1982, «Chira and Santa Rivers Beach Sands,» Consulcont e.r.i.l., Lima.

Villachica, C., Llamosas, I., and Riva, M., 1993, «Informe Sobre Vertimientos y Generación de Residuos en la Unidad de Producción de Yauricocha,» ConsultControl S.A.

Villachica, C., and Parra, H., 1980, «Clasificación y Molienda Preferencial: Causas y Efectos,» Third Int. Grinding Symp., Viña del Mar.

Villachica, C., and Sinche, C., 1984, «Reporte de Muestreo de Relaves El Molino - San Luis Gold Mines,» C.M.A. El Molino S.A.

Villachica, C., and Sinche, C., 1986, «Non Conventional Peruvian Processing,» International Mining, London.

Von Michaelis, H., 1984, «Role of Cyanide in Gold and Silver Recovery,» Cyanide and the Environment, D, Van Zyl (ed.), Colorado State Univ., (BiTech Publishers, Vancouver).

Wood, K., and McDonald, G., 1986, «Design and Operation of Thickened Tailings Disposal System at Les Mines Selbaie,» Canadian Inst. Min. Bull., November.

Yeomans, T., 1985, «Tailings Disposal at Kidd Creek,» 18th Ann. Meeting of the Canadian Miner of Federal Regulations, Title 43, Subtitle B, Subchapter C. - Minerals and Management, Parts 3400, 3600, 3700 y 3800, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1993.

## GLOSARIO

### GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS INGLES - CASTELLANO

Belt filters : filtros de faja

Buttress : apoyo

Cement grout injection : inyección de lechada de cemento

Compaction : compactación

Cone slopes : inclinaciones cónicas

Conveyors : fajas transportadoras

Crustal faulting : falla de la corteza terrestre

Cutoff : desviación

China clay : caolín

Debris : desechos

Dewatered tailings : relaves deshidratados

Dumped : vaciado

Embankment : terraplén

Embankment construction : construcción de terraplenes

End-dumpling : descarga final

Flowslide : derrumbe

Foundation : cimientos

Gullying : canalización

Mill : concentradora

Mine subsidence : hundimiento de la mina

Natural soils : tierra natural

Overtopping : desborde

Piping : socavamiento

Plugged : obturados

Ponded decant water : agua de decantación embalsada

Power failure : fallas en el suministro de energía

Regrading : nivelación

Reshaping : tratamiento

Seepage : infiltración

Slope : pendiente

Snowmelt : deshielos

Steep narrow valleys : valles estrechos y empinados

Stiff clays : arcillas duras

Strains : tensiones

Surcharge : sobrecarga, recargo

Thickened tailings : relaves espesados

Underground backfilling : relleno subterráneo