

Recibido: 09 / 10 / 2009, aceptado en versión final: 31 / 10 / 2009

Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales

The major environmental disasters produced by the mining - metallurgical activity worldwide: causes and consequences ecological and social

Roberto Rodríguez¹, Luciano Oldecop², Rogelio Linares³, Victoria Salvadó⁴

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar las principales causas de los grandes desastres medioambientales provocados por las actividades minero-metalúrgicas a nivel mundial. Para la realización del mismo se han analizado 363 casos, que incluyen los incidentes y desastres medioambientales más significativos del sector, recogidos en diferentes bases de datos, informes y publicaciones. Entre las principales causas de estos desastres hay que señalar: 1) la falta o incorrecto estudio de impacto ambiental (EIA), 2) el fallo de las estructuras de almacenamiento de residuos (instalaciones, presas, escombreras y pilas de lixiviación, etc.), 3) la no aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT) en las explotaciones mineras, 4) errores en el diseño de las instalaciones, 5) el no uso de las medidas de protección adecuadas en función de los riesgos existentes. La magnitud de estos desastres se ha visto incrementada por varias razones: el comportamiento negligente de las empresas y administraciones, la existencia de poblaciones cercanas, la singularidad y fragilidad ecológica del área de ubicación de las explotaciones mineras, la no existencia en muchos casos de los planes e instalaciones de emergencia, la falta de un plan de ordenación del territorio y la dilatada actividad minera en un área concreta. Todo ello ha dado lugar a que la Unión Europea obligue a todos los sectores productivos a elaborar el documento de las mejores técnicas disponibles (BAT), con vista a reducir estas catástrofes y sus efectos medioambientales.

Palabras clave: Relaves, minas, contaminación ambiental, metales pesados, desarrollo sostenible, cambio climático.

ABSTRACT

This study aims to analyze the main causes of major environmental disasters caused by mining-metallurgical activities worldwide. 363 cases were analyzed, including significant incidents and disasters, as reflected in various databases, reports and publications. The main causes of these disasters should be noted: 1) insufficient or improper environmental impact study (EIA), 2) the failure of waste storage structures (Tailing dams, tailings piles leaching, etc.). 3) No using best available techniques (BAT) in mines and metallurgical activities, 4) errors in the design of facilities, 5) failure to use appropriate security measures according to the risks involved. The magnitude of these disasters has been increasing for several reasons: the negligent behaviour of firms and administrations, the existence of nearby villages, the unique and fragile ecology of the area of location of mining operations, the absence in many cases of emergency plans and facilities, lack of a plan of land and extensive mining activity in a specific area. For this reasons the European Union has forced all productive sectors to develop the BAT document, in order to reduce these disasters and their environmental effects.

Keywords: Mine wastes, environmental disasters, heavy metals, failure a tailing dam, sustainable development.

1 Instituto Geológico y Minero de España. E-mail: andadaro@gmail.com

2 Universidad Nacional de San Juan, Argentina

3 Universidad Autónoma de Barcelona, España

4 Universidad de Girona, España

I. INTRODUCCIÓN

A diferencia de las catástrofes medioambientales provocadas por sectores productivos como la actividad agrícola, los desastres en el mundo del transporte marítimo y el de la polución atmosférica de las grandes zonas industriales, las catástrofes medioambientales producidas por la actividad minero-metalúrgica se encuentran mucho más localizadas. La causa de estos desastres está relacionada normalmente con la liberación al medio ambiente de importantes volúmenes de residuos sólidos, líquidos y gases. Debido a la naturaleza de la minería y al procesamiento de minerales, los volúmenes de residuos de la actividad minero-metalúrgica son significativamente mayores que los residuos domésticos e industriales juntos. Los volúmenes de residuos mineros generados anualmente en el mundo exceden con creces el volumen total de materiales que mueve anualmente la ingeniería civil en todo el mundo (ICOLD, 2001). La geoquímica característica de los residuos (en particular la movilidad de los componentes metálicos) es una fuente de preocupación e investigación constante por la comunidad científica internacional. Hay que señalar que los residuos generados por la actividad minero-metalúrgica se acumulan a perpetuidad sobre la superficie de la Tierra.

El propósito de este trabajo es analizar algunas de las principales catástrofes e incidentes medioambientales provocadas por la actividad minero-metalúrgica y extraer de ellas las lecciones que se pueden sacar y que sirvan en el futuro para identificarlas y lograr mejoras que reduzcan la incidencia de estas en el medio ambiente y sus ecosistemas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En la realización de este trabajo se emplea la información disponible en la literatura científica, bases de datos y diferentes informes técnicos, los cuales se citan a lo largo del texto. Entre las principales fuentes de información consultadas para la realización del mismo se encuentran los Boletines del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 121), donde se analizan 221 casos de incidente a accidentes de presas de residuos mineros. La colección de casos de fallas de Davies *et al.* (2001). Las bases de datos en el sitio de Internet WISE son: www.antenna.nl/wise/uranium/mdap.htm/ uranium projet, INGEMMET, UNEP entre otras.

III. RESULTADOS

En este apartado se analizarán diferentes catastros medioambientales que consideramos muestran la problemática ambiental asociada a las actividades minero-metalúrgicas a nivel mundial.

El desastre de Ok Tedi, Nueva Guinea: La falta de estudio de impacto ambiental (EIA)

La mina de Ok Tedi constituye uno de los ejemplos de falta de estudio de impacto ambiental (EIA) y la negligencia gubernamental y empresarial. Esta se encuentra cerca de las cabeceras del río Ok Tedi, en el distrito Norte de la Provincia Occidental de Papúa, Nueva Guinea. Situado en una zona remota de Papúa - Nueva Guinea, por encima de los 2000 m en el Monte Fubilan, en una región de alta precipitación y alta actividad sísmica. El desarrollo de la minería ha generado un verdadero desastre medioambiental. Las operaciones mineras se iniciaron en el año 1984. Al inicio de las operaciones, se había construido una presa de relaves, la cual colapsó por el terremoto de 1984. Los temblores sísmicos son comunes en la zona. Sin embargo, el Gobierno dio el visto bueno para que siguieran las operaciones sin ningún tipo de presas, debido a que la compañía alegó que era demasiado caro su reconstrucción. Desde esa fecha hasta la actualidad, han descargado al río 80 millones de toneladas de residuos sólidos y se desconoce el volumen de los efluentes líquidos. El vertido ha cambiado el lecho del río, causando un cambio en la velocidad de flujo, convirtiéndolo en más lento. El vertido de residuos y el aporte de la erosión superficial debido al elevado volumen de precipitaciones han afectado las vías de transporte establecidas por los indígenas en los cauces superficiales del río y efluentes. Las inundaciones causadas por el cauce del río ha dejado plantada una gruesa capa de lodos contaminados en la llanura de inundación, que ha afectado las áreas de cultivo agrícola, entre las que se pueden señalar el cultivo del plátano y palmeras que constituyen importantes alimentos para la dieta local (Burton, 2006; Kirsch, 2006; Australian Associated Press, 2007).

Los problemas de contaminación debido a una mala gestión ambiental han causado grandes daños ambientales y sociales, a las 50 000 personas que viven en las 120 aldeas aguas abajo de la mina. El área afectada por las actividades minero-metalúrgicas y sus vertidos es de 1300 kilómetros cuadrados. La concentración de cobre en el agua superficial es 30 veces por encima del nivel normal establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Sin que se dispongan de datos de las aguas subterráneas (Kirsch, 1996).

El fallo de las estructuras de almacenamiento de residuos (instalaciones, presas, escombreras y pilas de lixiviación, etc.)

En este aspecto, el volumen de casos conocidos es significativo, pero en la mayoría de los ellos, la información es fragmentaria, y en muchos casos se desconocen las características propias de los ma-

teriales involucrados en los incidentes. De acuerdo al análisis de 251 casos de accidentes de presas de residuos mineros ocurridos en todo el mundo, de los cuales 221 han sido publicados en los Boletines del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 121), las causas más comunes de falla de las estructuras de residuos son las siguientes:

- 1) Deslizamiento del talud,
- 2) terremoto,
- 3) sobrepeso,
- 4) problemas de fundación,
- 5) tubificación,
- 6) falla por problemas en las estructuras auxiliares,
- 7) erosión del dique,
- 8) subsidencias o colapso del terreno.

Estas se han enumerado en orden decreciente del número de casos de presas que han fallado por el mencionado mecanismo de falla anteriormente citado y de las que se tiene conocimiento a nivel mundial en función de la literatura científica consultada (Figura 1):

En los apartados siguientes, analizaremos cada uno de los diferentes mecanismos de fallas identificados en la figura 1. El análisis se realizará considerando los diferentes aspectos identificados en la literatura consultada y los casos históricos mejor documentados.

DESLIZAMIENTO

De acuerdo al análisis de 251 casos de accidentes de presas de residuos mineros ocurridos en todo el mundo, se identifica el deslizamiento del talud de la presa o de toda la presa sobre su fundación, como la causa más frecuente de rotura. El deslizamiento de un talud ocurre cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo, exceden la resistencia al corte del material. Los eventos que

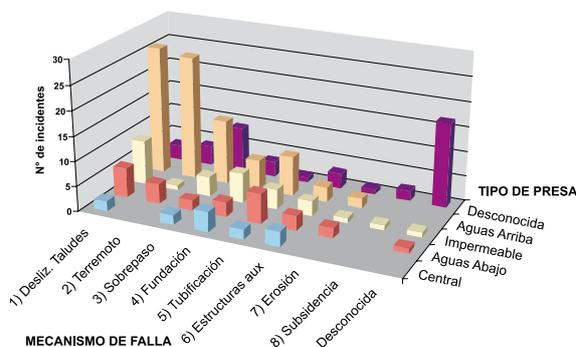


Figura 1. Número de incidentes versus principales mecanismos de fallas de los diferentes tipos de presas de residuos mineros de acuerdo al sistema de cierre utilizado (Oldecop y Rodríguez, 2006).

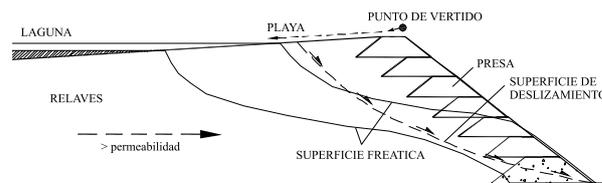


Figura 2. Inestabilidad del talud de una presa de residuos por aproximación del nivel freático.

determinan el inicio del deslizamiento pueden ser de diferente naturaleza. En particular, para las presas de residuos mineros, tres situaciones típicas son las que comúnmente desencadenan un deslizamiento de talud:

- 1) Elevación de la superficie freática y su aproximación al talud,
- 2) Desarrollo de presiones de poro durante trabajos de recrecimiento (ritmo de recrecimiento excesivo que no permite la disipación de presiones de poro), durante la instalación de la cobertura o por tránsito de maquinaria pesada,
- 3) Licuación de las zonas saturadas del depósito debido a una acción sísmica.

Situaciones peligrosas también pueden generarse por una operación deficiente u otros factores, como por ejemplo el congelamiento de las capas superficiales que impide el drenaje y provoca el aumento de las presiones de poro.

La posición de la superficie freática juega un papel fundamental como factor desencadenante de muchos deslizamientos de taludes. La aproximación de la superficie freática al talud puede ocurrir por:

- 1) Elevación del nivel de agua en la laguna de decantación debido a aportes de agua de crecidas o lluvias persistentes o por obstrucción de tuberías de evacuación,
- 2) Por infiltración de agua de lluvia,
- 3) Por operación inadecuada de la presa (mal manejo del vertido), provocando que la laguna de decantación se aproxime a la presa,
- 4) Presencia de mantos de material fino que provoquen la ocurrencia de niveles freáticos colgados. En casos extremos, el nivel freático puede aflorar por la superficie del talud.

Chandler y Tosatti (1995) analizaron la estabilidad del talud de la presa superior de Stava fallada en 1985. El análisis se realizó para cuatro posiciones hipotéticas de la superficie freática (A, B, C y D) que se muestran en la figura 3. Los factores de seguridad que se obtienen para la superficie de deslizamiento mostrada son: 1.35, 1.21, 1.04 y 0.76, considerando cada una de las superficies A, B, C y D, respectivamente.

mente. Sabiendo que esta presa no tenía disposiciones específicas para facilitar el drenaje, es fácil pensar que el mecanismo de falla más probable haya sido la aproximación de la superficie freática al talud.

En la mayoría de las presas de residuos mineros, el manejo del agua dentro del depósito es un factor determinante del nivel de seguridad con que se opera. La técnica más habitual para el control del agua freática es hacer que la permeabilidad de los residuos mineros aumente desde el centro del depósito hacia los bordes (Figura 2). El vertido de los residuos mineros se hace en distintos puntos a lo largo del perímetro del depósito, de manera que se forme una playa de baja pendiente por la que los residuos mineros recién vertidos fluyen hacia el centro, donde se ubica la laguna de decantación. El escurrimiento de los residuos mineros sobre la playa provoca una clasificación espontánea de las partículas por tamaño. Las fracciones más gruesas se depositan cerca del punto de vertido, en tanto que los finos se transportan hacia zonas más distantes de la presa. La fracción más fina sedimenta bajo agua en la laguna de decantación. La efectividad de esta técnica para controlar la permeabilidad del depósito depende fundamentalmente de la relación sólido líquido con que se vierten los residuos mineros.

Ensayos en canal realizados por Blight (1994) sugieren que a medida que aumenta la concentración de sólidos del material vertido (residuos mineros más espesos), la efectividad del mecanismo de clasificación disminuye. Se observa en la figura 4 que para una concentración de sólidos del 16% (peso de sólidos secos/peso total del material), la clasificación es muy efectiva, resultando en curvas granulométricas bien diferenciadas de las muestras tomadas en distintos puntos de la playa. Con una concentración del 26%, la efectividad disminuye bastante y con una concentración del 32%, el mecanismo se inhibe por completo. Esto significa que para un mismo material y granulometría, la variación de la relación sólido/agua puede tener profundos efectos en la distribución de permeabilidades, y por lo tanto en la posición

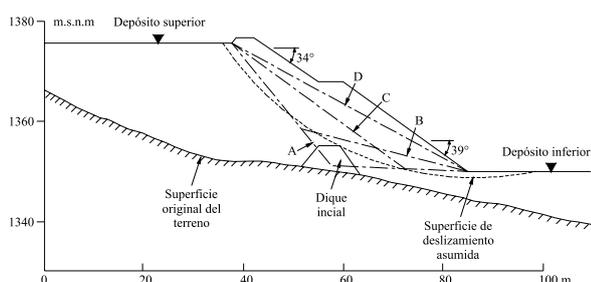


Figura 3. Condiciones de estabilidad de la presa de colas de Stava (dique superior), fallada en 1985, bajo cuatro hipótesis de posición de la superficie freática: A, B, C y D (Chandler y Tosatti, 1995).

de la superficie freática. Blight (1994) señaló otros factores que pueden en menor medida influir en la geometría de la playa y en la efectividad del mecanismo de clasificación, tales como el caudal de residuos mineros vertidos y el hecho de que estas fluyan por una superficie seca o húmeda.

Otra técnica utilizada para el control de la granulometría es la de los hidrociclones, que separan el caudal de residuos mineros en una fracción gruesa y otra fina. La primera (arena) se utiliza para el recrecimiento de la presa, en tanto que la fina se deposita en la parte central del depósito. En la actualidad, el diseño de depósitos de residuos mineros tiende cada vez más a incorporar sistemas de drenaje que permiten ejercer un control más directo sobre el agua freática.

En número importante de casos de deslizamiento, se sabe que el accidente estuvo precedido por un periodo de lluvias intensas. Debido a la granulometría muy fina de los residuos mineros, el volumen de agua almacenado de forma capilar (a presión menor que la atmosférica) puede ser muy importante. Este volumen reduce considerablemente la capacidad de almacenamiento de agua en los poros del material y como resultado de esto, la infiltración de cantidades relativamente pequeñas de agua de lluvia puede provocar una rápida elevación del nivel freático y la saturación de los residuos con el correspondiente descenso de la estabilidad del talud.

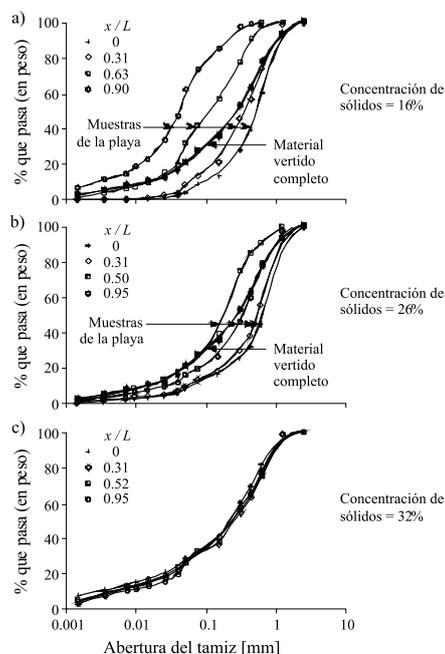


Figura 4. Efecto de la concentración de sólidos en la "efectividad" de la clasificación por tamaños en una playa de relaves. Datos obtenidos en ensayos en canal (Blight, 1994). a) Concentración de sólidos (peso seco/peso total) = 16%, b) 26% y c) 32%. x/L = puntos en donde se tomaron las muestras ($x/L = 0$ es el punto de vertido).

EFFECTO DE LA PENDIENTE DEL TALUD SOBRE EL DESLIZAMIENTO

Es evidentemente que la pendiente con que se diseña y construye el talud es uno de los factores primordiales para asegurar su estabilidad. Algunos casos históricos de deslizamiento ocurrieron en taludes construidos con pendientes evidentemente excesivas. Por ejemplo, en el caso de Stava (Italia, Figura 3), en 1985, el talud deslizado tenía una pendiente 1:1.2 (39°) (Chandler y Tosatti, 1995) y en el de Fernandinho (Brasil) con pendiente 1:1.1 (42°) (ICOLD, 2001). Se observa que en algunos casos, la pendiente del talud coincide con el ángulo de reposo del material, es decir, el talud es el que resulta naturalmente del volcado del material con que se construye la presa. Es obvio decir que al margen de seguridad de estos taludes es inexistente.

TERREMOTOS

El terremoto de Northridge (California, 1994) provocó la falla de la presa de Tapo Canyon, de 24 metros de altura, utilizada para el almacenamiento de residuos finos provenientes del lavado de áridos. La falla implicó el flujo de una gran cantidad de residuos a lo largo de 180 metros aguas abajo (Harder y Steward, 1996). Afortunadamente, por estar ubicada en una zona despoblada, no provocó víctimas ni otras pérdidas económicas importantes. El depósito se había iniciado en la depresión de una antigua cantera. Para facilitar el drenaje durante su explotación, se había abierto un canal en la roca que desaguaba en un arroyo vecino (Figura 5), que se cerró con material rechazado de la explotación. Luego, la presa continuó recreciéndose hacia aguas arriba con el mismo material. Al momento de la falla, la presa llevaba dos años inactiva, ya que se había detenido su recrecimiento y el vertido de residuos.



Figura 5. Vista aérea de la presa de Tapo Canyon previa a su rotura (Foto de Northridge Collection, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley). La H representa la costra de hormigón.

Sin embargo, en la mitad este se realizaba el lavado de los camiones mezcladores de hormigón, por lo que en la mitad oeste del depósito existía una laguna en contacto directo con la presa.

Se estima que el terremoto provocó una aceleración máxima entre 0.3 y 0.4 g en el sitio de emplazamiento de la presa. El movimiento indujo la licuación del material de la presa, que se encontraban saturados debido a la proximidad de la laguna y también de los residuos almacenados. Esto produjo una brecha de unos 60 metros de ancho por la que escaparon los residuos mineros licuados. Es probable que la falla se haya iniciado en la zona del antiguo canal de desagüe, con la licuación del material de tapón y que ello haya provocado la falla en cadena de resto de la presa y la licuación de los residuos.

El fenómeno de licuación de materiales granulares (no plásticos) se puede entender fácilmente si se comprende primero la tendencia de estos materiales a reducir su volumen de poros cuando se los somete a deformaciones de corte cíclicas. Esta tendencia se ilustra en la Figura 6. Cuando un material granular tiene sus poros llenos de agua (condición saturada), estos cambios de volumen deben ocurrir a expensas de expulsar agua en los poros. Esta transferencia de agua puede tomar más o menos tiempo dependiendo de la permeabilidad del material. Si la permeabilidad es baja, la distancia a las fronteras drenantes es grande o las acciones (cargas o deformaciones) ocurren rápidamente, ocurrirá un incremento de la presión del agua. Este aumento de la presión del agua intersticial tiene el efecto de disminuir la resistencia al deslizamiento entre partículas, hasta el punto de

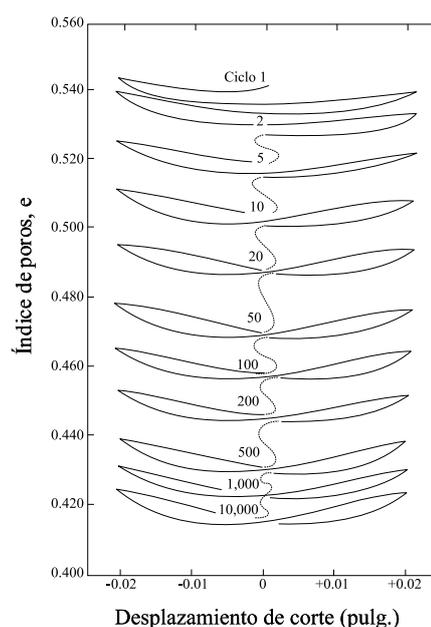


Figura 6. Ensayo de corte directo drenado con aplicación de una deformación de corte cíclica (Youd, 1972).

hacer que el material fluya como un líquido viscoso, de alta densidad.

DESIZAMIENTO SOBRE LA FUNDACIÓN

El deslizamiento de la presa de Aznalcollar (España, 1998) fue provocado por un cúmulo de problemas en la fundación de la presa. La presa es de tipo anular, con recrecimiento hacia aguas abajo y una pantalla impermeable de arcilla en su cara de aguas arriba (Figura 7a). Todo el depósito estaba apoyado sobre una delgada capa aluvial (de aproximadamente 4 metros de espesor) y esta sobre un depósito de arcillas marinas carbonatadas del terciario, con un espesor mayor a 60 metros. Las propiedades mecánicas de estas arcillas son muy particulares. Ensayadas al corte directo, presentan un comportamiento extremadamente frágil, con una rigidez inicial elevada y un pico de resistencia muy agudo y una caída de resistencia abrupta. Por otra parte, la permeabilidad de la arcilla es extremadamente baja, entre 2 y 7×10^{-9} cm/s (Alonso y Gens, 2006).

Una sección de 600 metros de longitud del costado SE se deslizó a una distancia de 60 metros en dirección al cauce del río Agrío, sin que se detectaran señales que permitieran prever el accidente. Por la brecha producida, se escaparon 7 millones de metros cúbicos de residuos mineros fuertemente ácidos que contaminaron los valles de los ríos Agrío y Guadiamar. El deslizamiento fue eminentemente de traslación, en el que la presa se movió prácticamente como bloque rígido. La superficie de deslizamiento, plana con una

ligera inclinación (2°) en la dirección del movimiento, se desarrolló en las arcillas frágiles de la fundación, a 10 metros por debajo de la superficie natural del terreno (Figura 7). Aguas abajo, se desarrolló una importante cuña de empuje pasivo que llegó a invadir el cauce del río Agrío.

Se identificaron varios factores que contribuyeron a la falla (Alonso y Gens, 2006; Olalla y Cuellar, 2001). Todos ellos provienen las características particulares de la fundación:

- La presencia de planos de estratificación, que determinaron la dirección y el mecanismo de deslizamiento. Estas discontinuidades eran tan sutiles que solo se pudieron detectar a partir de la exposición de bloques de arcilla al aire y su secado.
- La fragilidad de la arcilla, que probablemente favoreció el desarrollo de un mecanismo de falla progresiva al ritmo del recrecimiento de la presa. Al respecto existe un factor negativo adicional. La pendiente constructiva del talud de aguas abajo de la presa (que probablemente coincidió con el ángulo de reposo del material del material de escollera utilizado) fue significativamente mayor que la prevista en el proyecto. Si bien, en este caso, esto no determinó la falla del talud, la elevada pendiente contribuyó a generar mayores tensiones de corte en la fundación, bajo el pie de aguas abajo de la presa (Figura 7b).
- La baja permeabilidad y homogeneidad del depósito de arcillas, que retrasó la disipación de las presiones de poros generadas por la construcción de la presa y el llenado del depósito. De hecho, la presa se diseñó considerando las presiones intersticiales resultantes del análisis de flujo en condición estacionaria. Esta es una práctica habitual en el proyecto de presas, ya que se supone que constituye una hipótesis de diseño conservadora. La medición de presiones intersticiales en la arcilla luego de ocurrida la falla, demostró que las presiones eran mucho mayores que las previstas y que dicha condición estacionaria estaba muy lejos de ser alcanzada (Figura 7b).

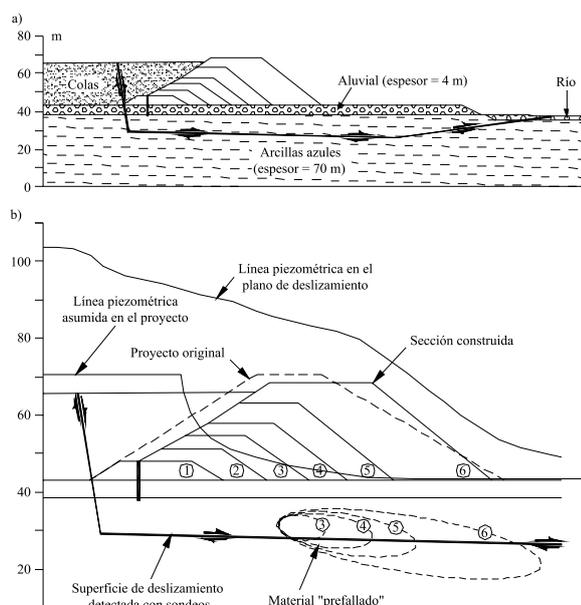


Figura 7. Presa de Aznalcollar, perfil transversal en la sección deslizada (Moya, 2001; Alonso y Gens, 2006). a) Sección vertical por la presa y la fundación. Superficie de deslizamiento detectada con sondes. b) Detalle: etapas de construcción, mecanismo de falla progresiva y piezometría.

SOBREPASO, TUBIFICACIÓN Y EROSIÓN

A lo largo del proceso de construcción y llenado, la morfología y estructura de un depósito de residuos mineros cambia en el tiempo. La forma de operación de la presa puede tener una influencia importante en el riesgo de sobrepaso, tubificación o erosión.

Una operación inadecuada en el vertido de los residuos puede hacer que la altura de resguardo disminuya a niveles peligrosos. La obstrucción de tuberías de desagüe es otro problema que puede llevar al

sobrepaso. El hecho de que, por razones de protección del medio ambiente, el agua almacenada y también la que ingresa accidentalmente en la presa no se puede verter al medio, condiciona fuertemente el diseño y la operación. Si el depósito es de tipo anular, el único aporte de agua que puede recibir es el de las precipitaciones, pluviales o niveas, que caigan en el área que ocupa su planta. Si, en cambio, el depósito está ubicado en un valle, con una presa de cierre por el costado de aguas abajo, entonces las previsiones hidrológicas deberán tener en cuenta el área de captación de la cuenca y el volumen de agua que puede generar una lluvia o deshielo. En algunas presas de este tipo se construyen estructuras de desvío (canales o tuberías) para evitar que el agua de escurrimiento superficial ingrese en el depósito.

Un ejemplo interesante de falla por sobrepaso es el de la presa de Merriespruit (Sudáfrica), ocurrida en 1994 (Fourie y Papageorgiou, 2001). La presa era de tipo anular con planta rectangular y tenía al momento de su rotura 31 metros de altura. El recrecimiento se hacía hacia aguas arriba, utilizando los mismos residuos mineros como material de construcción y permitiendo su secado para favorecer su consolidación por acción de las fuerzas capilares. Casi un año antes de ocurrir la falla, el llenado del depósito fue suspendido por haber presentado problemas de estabilidad. Sin embargo, de forma esporádica, ocurrieron escapes de residuos mineros y agua desde un depósito vecino que continuaba en operación. A consecuencia de esto, la laguna de decantación fue empujada gradualmente hacia el borde que luego fallaría. No se conoce la altura de resguardo al momento de la falla, pero se estima que era escasa. La falla se inició luego de una tormenta de lluvia de 50 litros/m², se supone que por sobrepaso del coronamiento (Fourie et al., 2001). La brecha dejó escapar 600 000 m³ de residuos mineros que fluyeron a lo largo de 3 Km, provocando 17 muertos.

El mecanismo de falla de la presa de Merriespruit se explica en la figura 8a. El agua, vertiendo por el coronamiento, erosionó la cara exterior del talud iniciando una brecha de erosión regresiva. Es posible que pequeños deslizamientos locales aceleraran el proceso de erosión (Blight, 1994). El vertido continuado de agua erosionó también el material de estos deslizamientos acumulado al pie del talud. Al desaparecer la estructura de soporte exterior, los residuos mineros más finos y con elevado contenido de agua del centro del depósito comenzaron a ser sometidas a tensiones de corte crecientes. Fourie y Papageorgiou (2001) realizaron ensayos no drenados de los residuos mineros almacenados en la Presa de Merriespruit, encontrando que para las densidades y niveles de confinamiento que existían en la presa, su comportamiento es de tipo contractivo, y por lo

tanto potencialmente licuable. En un determinado punto del proceso, la resistencia de pico no drenada de los residuos mineros fue superada, y a partir de ese momento un mecanismo de falla progresiva contribuyó a acelerar la rotura. El resultado fue lo que se conoce como “licuación estática” de los residuos mineros. La inestabilidad iniciada en una porción limitada de material, se extendió a una gran masa que fluyó a través de la brecha en forma de líquido viscoso.

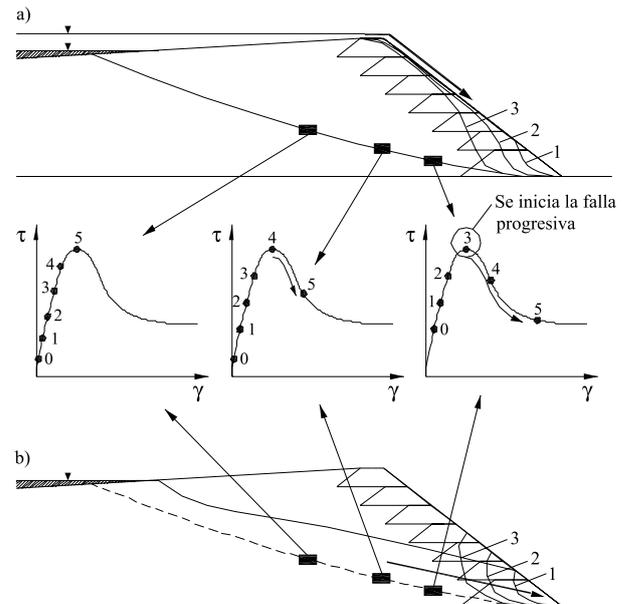


Figura 8. a) Mecanismo de falla de una presa por sobrepaso, provocando la erosión del talud y la licuación estática de los relaves. b) Mecanismo de falla de una presa por tubificación.

Los procesos de tubificación provocan mecanismos de falla similares al descrito en el párrafo anterior. Se inician por afloramiento de agua freática en un talud o por lavado de partículas hacia el exterior o hacia otros materiales más gruesos. La pérdida de material genera un proceso de erosión retrógrada, que va ampliando la vía de agua, y por lo tanto el caudal y la capacidad de provocar más erosión (Figura 8b). El proceso acaba por desestabilizar el talud de la presa, provocando la aparición de chimeneas o deslizamientos, y en definitiva la aparición de una brecha. El aumento de las tensiones de corte sobre los residuos mineros provoca su licuación estática y el flujo a través de la brecha. Un proceso similar se produce en el caso de fallas por erosión. La crecida de un curso de agua vecino, el agua descargada por el vertedero, un canal que corre paralelo al pie del talud o el almacenamiento de agua contra el pie del talud pueden producir su erosión hasta que se elimina el material de la presa, provocando la rotura, la licuación de los residuos mineros y su vertido.

FALLA DE ESTRUCTURAS AUXILIARES

De acuerdo a la colección de casos históricos recogida en el Boletín 121 del ICOLD (2001), la mayor cantidad de incidentes originados en las estructuras auxiliares se deben a fallas en los sistemas de decantación del agua sobrenadante del depósito. Es común que estos sistemas estén formados por una o más chimeneas o torres de decantación en las que el nivel de rebalse se va elevando gradualmente a medida que el depósito crece en altura. Una tubería que corre por el fondo del depósito lleva el agua desde la base de la chimenea hacia el exterior. Es bastante frecuente la falla de estos conductos, lo que deriva en filtraciones de agua desde la tubería hacia los residuos mineros con los consiguientes efectos indeseables de humedecimiento y elevación del nivel freático; o bien la creación de una vía de escape para los residuos mineros de poca consistencia. Otros incidentes dentro de esta categoría se deben a rotura de tuberías de descarga de residuos mineros hacia el depósito, con el consiguiente vertido y peligro de erosión de la presa; falla de vertederos o de sistemas de by-pass para crecidas por haber sido diseñados con una capacidad inadecuada y problemas con tuberías de drenaje.

Como ejemplo interesante de falla iniciada por un problema en una tubería de decantación, se puede citar el del complejo de dos presas de residuos mineros de Stava (Italia), cuyo colapso ocurrió en 1985. Chandler y Tosatti (1995) propusieron como factor más probable de inicio de la falla la fuga de agua del conducto de decantación del depósito superior. A un cierto punto de la construcción de la presa, este conducto se obstruyó. Para solucionar el inconveniente se construyó un by-pass (Figura 9). Esto se hizo mediante un tubo de acero horizontal que se acopló al extremo libre del conducto de decantación. Excavando los residuos mineros hasta descubrir un tramo de conducto más allá de la obstrucción, se construyó una chimenea que conectaba el otro extremo del tubo de acero con el conducto de decantación. El tubo de acero estaba directamente apoyado sobre la superficie de los residuos mineros recientemente vertidos. Luego, cuando el depósito continuó creciendo, el tubo quedó inmerso en la masa de residuos mineros, que son bastante compresibles. Bajo el peso de las nuevas capas, el tubo pudo haber sido arrastrado hacia abajo y, en un cierto momento, su extremo arrancado de la chimenea. Esto permitió que el agua transportada por el tubo escapara directamente a los residuos mineros haciendo que la superficie freática en ese sitio se elevara. En la figura 3 se mostraba, de acuerdo a los análisis de estabilidad realizados por Chandler y Tosatti (1995), cuan sensible era el talud de esta presa a una elevación de la superficie freática.

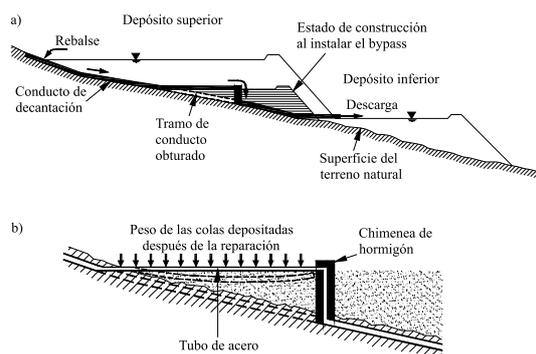


Figura 9. Complejo de Stava. a) Esquema de la reparación realizada para salvar un tramo de conducto de decantación obstruido en la presa superior (fuera de escala). b) Detalle (Chandler y Tosatti, 1995).

SUBSIDENCIA

Los casos de falla de presas de colas por subsidencia no son frecuentes. En la colección de Boletín 121 del ICOLD (2001) solo se registran tres casos de un total de 221. Todos ellos están asociados a la actividad minera subterránea que, por proximidad o por condiciones geológicas favorables, en un cierto momento llegan a afectar a los depósitos de colas en superficie. En dos de los casos registrados, Mulfilira (Zambia) y Atlas (Filipinas), la falla consistió en el escape de colas licuadas hacia galerías subterráneas en donde se estaban realizando actividades de extracción.

En cambio, el caso de la presa de Iwiny (Polonia) parece ser una auténtica falla por subsidencia de la fundación (ICOLD, 2001). La falla ocurrió en 1967 y la información publicada es escasa. La presa estaba construida a través de un valle. Las actividades de extracción se hacían de forma subterránea. Una de las galerías había avanzado, aproximándose a la presa desde aguas arriba, por debajo de la posición del depósito de colas. Al momento de la falla, el extremo de la galería estaba a 200 metros del eje de la presa. Una zona de falla de unos 20 metros de espesor cruzaba la presa cerca de su estribo izquierdo. Al parecer, las actividades de excavación subterránea y las filtraciones desde la superficie hacia la galería, incrementadas por el bombeo de agua para mantenerlas en seco, provocaron que el material de la fundación de la presa fuera arrastrado hacia la zona de falla. Esto provocó la subsidencia de la fundación de la presa y la aparición de una brecha en la misma que permitió el vertido de 4.6 millones de metros cúbicos de colas y la muerte de 18 personas. La figura 10a muestra la disposición en planta de la presa, de la galería en cuestión y la zona de falla. La figura 10b muestra un perfil vertical coincidente con el eje de la presa.

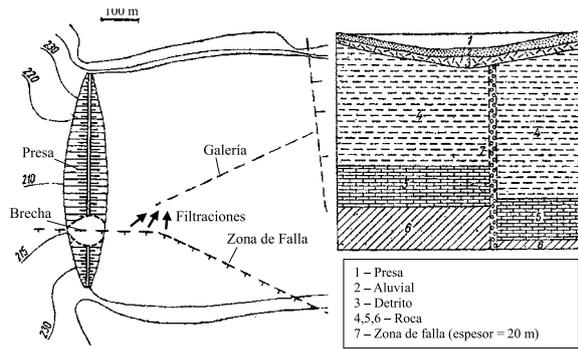


Figura 10. Falla de la presa de Iwiny (Polonia, 1967). a) Planta mostrando la disposición de la presa, el reservorio de colas, las galerías subterráneas de la explotación minera, la traza de la zona falla, que atraviesa el reservorio y la fundación de la presa. b) Corte vertical por el eje de la presa y su fundación. (IMGW, <http://www.otkz.pol.pl/>).

La no aplicación de las mejores técnicas disponibles (MTD) en las explotaciones mineras

En este aspecto, son muchos los casos que se pueden señalar. Pero nos centraremos en un ejemplo concreto de desastre medioambiental que se ha podido estudiar y evaluar, nos referimos al caso de la Bahía de Portman en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, España (García, 2004). En esta operación minero-metalúrgica se realizó el vertido del residuo del proceso de flotación directamente al Mar Mediterráneo, lo que provocó la colmatación de la bahía de Portmant y el deterioro de la flora y la fauna marina de la región. Los efectos de contaminación perduran hasta nuestros días. En esta comunidad se encuentra la contaminación con sedimentos ricos en metales pesados del Mar Menor producto del vertido de residuos mineros en los cauces de aguas superficiales. La evolución del proceso de colmatación de la Bahía de Portman se puede apreciar en la figura 11. El resultado de la Bahía de Portman es uno de los ejemplos más negativos de lo que puede provocar las actividades extractivas sobre el medio marino y sus ecosistemas asociados (Martínez et al., 1993). En la bahía se encuentran almacenados unos 30 Mm³. El efecto del vertido ha provocado una alta concentración de Cd, Pb, Zn en los sedimentos como se puede ver en la figura 12.

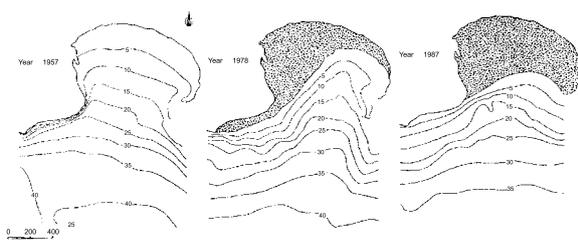


Figura 11. Evolución de la batimetría en la Bahía de Portman (Martínez et al., 1993).

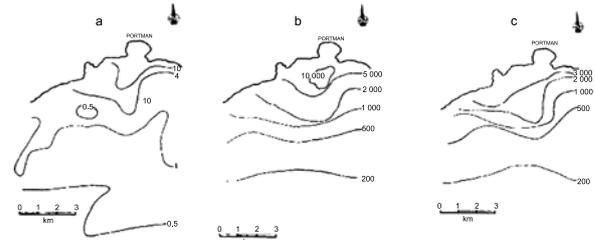


Figura 12. Contenido de metales (ppm) en sedimentos de la Bahía de Portman. a: Cadmio, b: Zinc, c: Plomo (Instituto Español de Oceanografía. Murcia, 1984).

El no uso de las medidas de protección adecuadas en función de los riesgos existentes

Uno de los ejemplos que mejor ilustra esta causa es la no impermeabilización del vaso de las presas y escombreras de residuos, la falta de planes de cierre en las explotaciones mineras y la rehabilitación de las áreas afectadas por estas. De todas estas deficiencias, la principal causa de contaminación de las aguas subterráneas producidas por la minería a nivel mundial es la infiltración de los lixiviados hacia los acuíferos debido a la falta de impermeabilización de las presas y escombreras de almacenamiento de residuos y su cierre al final de la actividad minera. La falta de impermeabilización y cierre de las acumulaciones de residuos ha dado lugar a la que consideramos es la problemática medioambiental de mayor importancia asociada a las acumulaciones de residuos es el Drenaje Ácido de Minas (AMD, en inglés Acid Mine Drainage). El DAM ha provocado la contaminación de las masas de aguas continentales (aguas subterráneas y superficiales) y las masas de aguas marinas en gran parte del mundo. Se estima que solo en Estados Unidos hay más de 20 000 km de causas de aguas superficiales (ríos) que están afectados por la existencia de AMD (Kleinmann, 1989). El DAM está asociado también a la descarga de agua al medio de las diferentes galerías y túneles construidos por la minería subterránea. Uno de los ejemplos más conocidos en América del Sur es el caso del túnel Kingsmill con un caudal de 33 millones de metros cúbicos al año y el túnel Vitoria con 7,5 millones de metros cúbicos al año ambos en Perú. Este AMD es vertido en el cause del río Mantaro que tiene en su cuenca hidrográfica una población de un millón de habitantes (Figura 13). En el caso de los dos tunes de Perú son un ejemplo fehaciente de la falta de un estudio de impacto ambiental y de las condiciones hidrogeológicas del lugar.

El AMD en España está presente en varias regiones mineras. Pero sus dos máximos exponentes se encuentran en el Río Odiel y Río Tinto, en las que se puede encontrar AMD de origen natural y antropogénico. Estos dos ríos drenan los materiales de la llamada Faja Pirítica Ibérica (FPI), que se extiende por el

suroeste de la península ibérica, entre Andalucía occidental y el sur de Portugal. La FPI es una banda de más de 250 Km de largo y 75 Km de anchura máxima, donde se han localizado más de 80 yacimientos de sulfuros masivos y más de 300 de manganeso. Quizás sea la mayor concentración de sulfuros masivos en la corteza terrestre, con más de 400 Mt de sulfuros masivos y unos 2000 Mt de stockwork de baja ley. Se ha explotado interrumidamente desde el siglo VIII a. de C. para la extracción de oro, plata y cobre (Nocete et al., 2005). En la época romana, hubo una gran actividad minera en la zona, de la que quedan numerosos restos repartidos por toda la FPI. Después, la minería se redujo hasta el gran resurgimiento que se inició a mediados del siglo XIX y continuó durante todo el siglo XX. Aunque, actualmente, no existe ninguna explotación de sulfuros activa, en la enorme cantidad de residuos mineros existentes en la FPI se sigue produciendo la oxidación de los sulfuros y, por tanto el DAM. El máximo exponente de este tipo de contaminación es el río Tinto, que presenta valores de pH próximos a 2,5 antes de su desembocadura en la Ría de Huelva (Cánovas et al., 2006) y cuyas aguas contienen enormes cantidades de

metales tóxicos disueltos (Fe, Al, Cu, Zn, Mn, etc.). El Río Odiel tiene condiciones menos extremas, sin embargo la longitud de los tramos afectados es muy superior a la del Tinto, debido a su mayor caudal, supone el mayor aporte de contaminantes a la Ría de Huelva y Golfo de Cádiz (Olías et al., 2006). La mayor parte de estos contaminantes precipitan y quedan retenidos en los sedimentos de la Ría de Huelva al neutralizarse las aguas ácidas de estos ríos con aguas más salinas (Nieto et al., 2006), aunque los metales más móviles alcanzan las aguas del Golfo de Cádiz e incluso penetran en el Mediterráneo.

Efecto de las poblaciones cercanas, la negligencia de empresas y gobiernos

Hay que señalar que la actividad minero-metalúrgica es una fuente directa e indirecta de empleo, se dice que por cada empleo directo se generan entre 5 y 10 indirectos. En muchas regiones del mundo se han desarrollado las ciudades en torno a grandes yacimientos de minerales (p.e., la ciudad de Cartagena en España, la ciudad de Moa y Nicaro en Cuba, La Oroya en Perú, Zacatecas en México, Kabwe en Zam-

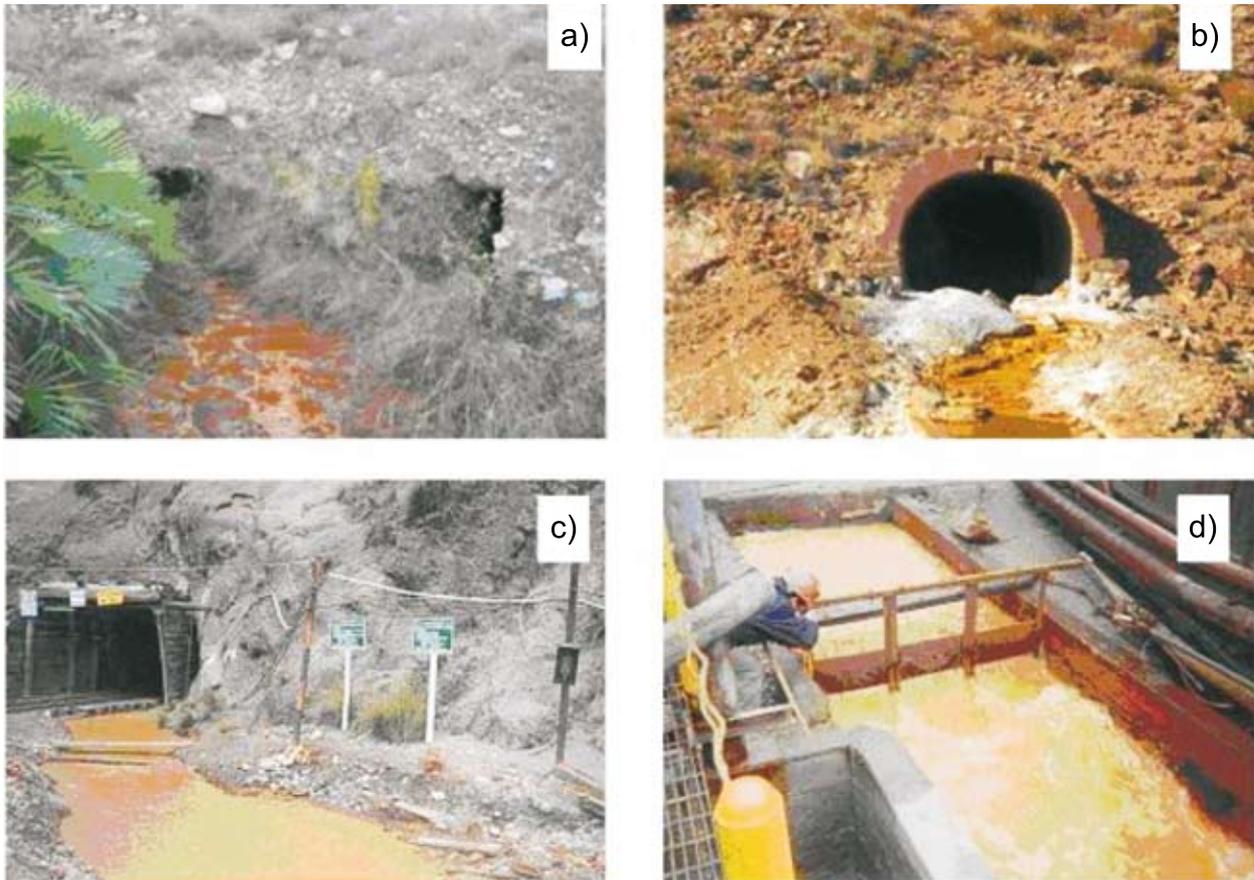


Figura 13. Drenaje de aguas ácidas: a) Galería de mina, en la rambla de Portmán con un caudal de 2 l/s, b) Túnel Lilian, en la corta Gloria Cartagena, España, con un caudal de 1 l/s, c) túnel Kingsmill, en Perú, con un caudal de 66 000 l/s (66 m³/s o ≈33 millones de metros cúbicos al año), y d) túnel Victoria 13 000 l/s (13 m³/segundo o ≈7.5 millones de m³/año).

bia. El desarrollo de asentamientos en estas zonas, normalmente se ha producido sin una planificación y ordenación del territorio, por lo que en muchos casos estos pueblos inicialmente son asentamientos insalubres. Donde inicialmente los servicios básicos de agua corriente, alcantarillado y luz eléctrica y asistencia sanitaria son nulos.

Recientemente, un grupo de expertos en medio ambiente y salud dirigido por investigadores de la universidad de Harvard o Idaho (<http://www.nuestroclima.com>), bajo el auspicio del Instituto Blacksmith determinaron cuáles son los sitios más peligrosos para la salud humana, en especial para los niños, debido a sus elevadas concentraciones de productos contaminantes y tóxicos. Dentro de ese grupo establecieron un ranking de los **Diez Sitios** más contaminados del mundo:

1. Chernobil (Ucrania)
2. Dzerzhinsk (Rusia)
3. Haina (República Dominicana)
4. Kabwe (Zambia)
5. La Oroya (Perú)
6. Linfen (China)
7. Mailuu-Suu (Kirziguistán)
8. Norilsk (Rusia)
9. Ranipet (India)
10. Rudnaya Pristan (Rusia)

El 60% de los mencionados sitios está vinculado directamente con la actividad minero-metalúrgica: Kabwe (Zambia), La Oroya (Perú), Linfen (China), Mailuu-Suu (Kirziguistán), Norilsk (Rusia), Rudnaya Pristan (Rusia). En estos 6 casos se combinan varias de las causas que han incrementado el efecto de los desastres medioambientales que ha provocado la actividad minero-metalúrgica. Considerando la importancia que tienen cada uno de ellos y las enseñanzas que aportan, los analizaremos a continuación sin pretender ser exhaustivos, para mayor información se pueden consultar las fuentes y referencias utilizadas:

Kabwe, Zambia

La segunda ciudad en tamaño de Zambia está ubicada, aproximadamente, a 150 kilómetros al norte de la capital del país, Lusaka. Esta es una de las seis ciudades ubicadas alrededor del Copperbelt, desde el inicio de la próspera base industrial de Zambia. En 1902, se descubrieron allí ricos depósitos de plomo. Las vetas de mineral con concentraciones de plomo de hasta 20%, se excavaron profundamente en el terreno y se montaron instalaciones de fundición para el pro-

cesamiento del mineral extraído. Se encontraron ricos depósitos de mineral sulfuroso consistente en silicatos, óxidos y carbonatos de plomo, con porcentajes de concentraciones que promediaban hasta el 34%. Las operaciones de extracción y fundido del mineral se mantuvieron casi ininterrumpidamente hasta 1994, sin que el Gobierno asumiera el peligro potencial del plomo. Ese proceso de fundición se realizó sin controles durante dicho período y las fundiciones liberaron metales pesados en las partículas de polvo emitidas a la atmósfera, que se depositaron en el suelo de las áreas cercanas. La mina y la fundición no están actualmente activas.

La población potencialmente afectada se calcula en 250 000 personas. Los tipos principales de contaminantes son plomo y cadmio. En promedio, los niveles de plomo en sangre en los niños en Kabwe están entre 5 y 10 veces sobre el máximo permitido por EPA. En los pocos estudios realizados, las concentraciones medias de plomo en el suelo son del orden de los 2.400 mg/kg. La dispersión del plomo, cadmio, cobre y zinc en el suelo abarca un radio de 20 km alrededor de los procesos de extracción y fundición. La concentración en el suelo de esos cuatro metales fue superior varias veces a lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud.

En algunos barrios de Kabwe, se han registrado concentraciones en sangre de niños de 200 o más microgramos/decilitro y los registros muestran rangos promedio en niños entre 50 y 100 microgramos/decilitro. Los chicos que juegan en el suelo y hombres jóvenes que excavan las escorias del metal, son los más susceptibles al plomo producido por la extracción y la fundación. Un pequeño arroyo corre desde la mina hasta el centro de la ciudad y ha sido usado para llevar residuos desde la fundición. No hay restricciones para ese arroyo en algunas oportunidades los chicos locales lo usan para tomar baños. Además del agua, los secos y polvorientos patios de las casas de los trabajadores son una fuente significativa de contaminación local. Una de las formas más comunes en que los trabajadores y residentes se exponen a los niveles tóxicos de plomo a través de la inhalación del polvo contaminado que esta presente en la atmósfera y que al ser inhalado se aloja en sus pulmones, esto sucede con las partículas de polvo inferiores a dos micras.

Para que se tenga una idea de la gravedad de la contaminación, en los EE.UU. los niveles permisibles de plomo en sangre son menores a 10 mcg/dl. Los síntomas de envenenamiento agudo ocurren en niveles de 20 mcg/dl y más, provocando vómitos, diarrea y llegando hacia espasmos musculares y daño hepático. Los niveles más altos que diez son considerados insalubres y por encima de 120 producen a menudo la muerte.

Situación actual y actividad de remediación.—

Después de décadas de contaminación, la estrategia de limpieza para Kabwe es compleja y se encuentra en sus etapas primarias. El primer paso es la educación de la comunidad acerca de los riesgos de la contaminación con plomo y su susceptibilidad a la exposición al contaminante. Deben ser tomadas medidas preventivas y de precaución a fin de educar a la población acerca del problema y proveerles de un simple y concreto aviso para evitar la contaminación (tales como prohibir a los niños a jugar en la tierra, eliminar el polvo lavando los platos, la comida y las legumbres y verduras, etc.). Algunas áreas de Kabwe requieren una remediación drástica, como la necesidad de reubicar algunos barrios.

Blacksmith ha ayudado al entorno de Kabwe estableciendo una ONG local, Kabwe Environmental and Rehabilitation Foundation (KERF) (Fundación Ambiental y de Rehabilitación de Kabwe), cuyo rol es proveer servicios educacionales en cada comunidad con soporte y habilidades sanitarias de primeros auxilios para la gente local. Como resultado de las iniciativas y el compromiso local de Blacksmith, el Banco Mundial ha puesto un pie allí, aprobando una donación de 20 millones de dólares para limpiar la ciudad y acaban de completarse el estudio de campo que guiará la actividad inicial de limpieza que comienza en el 2007.

La Oroya, Perú.

El distrito de La Oroya, capital de la provincia de Yauli, pertenece a la Región Junín, en la Sierra Central del Perú. Está enclavado en las estribaciones orientales de la Cordillera de los Andes. Debido a su gran altitud (3750 msnm), su clima es frío y lluvioso. Posee una superficie total de 388,42 km². Es conocida, además, por poseer una de las chimeneas más altas de Sudamérica. Desde 1922, la región posee un gran centro metalúrgico que ha provocado uno de los mayores casos de contaminación en el Perú y el mundo, tanto del aire como del suelo, así como también de las aguas de los ríos Mantaro y Yauli. El Instituto Blacksmith calificó en el 2006 a la ciudad de La Oroya como una de las 5 ciudades más contaminadas del mundo. Las explotaciones mineras desarrolladas por las grandes compañías mineras, tanto nacionales (CENTROMÍN-PERÚ) como extranjeras (Cerro de Pasco Co. y DOE RUN PERÚ), que han explotado esta fundición en diferentes periodos desde el siglo XX, poco o nada hicieron para paliar esta situación, lo que ha derivado actualmente en el grado de contaminación del aire, que a ciertas horas del día, especialmente al mediodía, se hace casi irrespirable y hay que parar en ocasiones el centro metalúrgico.

Desde 1922, los adultos y niños de La Oroya, Perú, han estado expuestos a las emisiones tóxicas de la planta metalúrgica, que es propiedad en la actualidad de Doe Run Corporation de Missouri, EE.UU. La actividad metalúrgica es la causa de los peligrosamente altos niveles de plomo en sangre encontrados en los niños de esa comunidad. El noventa y nueve por ciento de los chicos que viven en las proximidades de La Oroya tiene niveles de sangre que exceden los montos aceptables, de acuerdo a los estudios realizados por el Director General de Salud Ambiental en Perú, en 1999. La contaminación por plomo es conocida por ser particularmente dañina para el desarrollo mental de los niños. Una encuesta desarrollada por el Ministerio de Salud del Perú, en 1999, reveló niveles de plomo en sangre entre los niños locales se mostraban peligrosamente altos, promediando los 33,6 microgramos/decilitro en niños con edades entre 6 meses y 10 años, el triple del límite establecido por la WHO, que es de 10 microgramos/decilitro.

La población potencialmente afectada es de 35 000 habitantes. Los tipos de contaminantes cuantificados en los estudios realizados (Informe Mantaro) son: Plomo, cobre, zinc y dióxido sulfúrico. Las concentraciones de dióxido sulfúrico también exceden los estándares de emisión de la Organización Mundial de la Salud en diez veces. La vegetación en los alrededores ha sido destruida por la lluvia ácida debido a las altas emisiones de dióxido sulfúrico. A la fecha, la extensión de la contaminación del suelo (radio de influencia de las emanaciones) no ha sido estudiada y no existe un plan concreto para la reducción de la emisión que haya sido acordado o implementado.

Se han llevado a cabo numerosos estudios para determinar los niveles y fuentes de plomo y otros metales que están siendo depositados en La Oroya. Pruebas limitadas han revelado contaminación del suelo a lo largo del pueblo con plomo, arsénico y cadmio. Sin embargo, todos estos estudios se han focalizado en la contaminación externa, sin embargo la exposición a una severa contaminación del aire que sufre la población no ha sido analizada en detalle.

Situación actual y actividad de remediación.— En el Acta de Ciudades de Aire Limpio de Perú, La Oroya está en la lista de pueblos que sufren niveles críticos de contaminación del aire. Pero no se ha tomado ninguna acción sistemática de prevención y monitoreo de la variación espacio temporal de la contaminación. En el 2004, la compañía Doe Run Corporation solicitó al Gobierno una extensión de cuatro años para el plan de manejo ambiental (PAMA) de las plantas. Un movimiento de ONG está encaminando su acción para presionar a la compañía y al gobierno a que desarrollen

las estrategias efectivas para la implementación de acuerdos de remediación del lugar y proveer de un plan de medidas que incluya la prevención y cuidado de la salud de los residentes y los afectados por la exposición a la contaminación.

Linfen, Provincia de Shanxi, China

La provincia de Shanxi es considerada como el corazón de la enorme industria en expansión del carbón de China, que provee las dos terceras partes de la energía de la nación. Dentro de este contexto, Linfen ha sido identificada como una de las ciudades más contaminadas del mundo. Las urgentes necesidades de carbón de China ha empujado el desarrollo de cientos de minas de carbón, acerías y refinerías de alquitrán, a menudo ilegales y sin control. Esto ha provocado el desvío de los cursos de agua y abrazado la tierra, haciendo que el cultivo agrícola en la provincia sea prácticamente imposible. El agua se encuentra tan racionada que aun la capital provincial, recibe solo unas pocas horas de agua por día.

La población potencialmente afectada se estima en 200 000. La esperanza de vida de la población de Linfen es tan solo de 60 años, comparada con los 70 que tiene el resto de China. Los tipos de contaminantes que les afectan son: cenizas-volantes, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, PM-2.5, PM-10, dióxido sulfúrico, componentes orgánicos volátiles, arsénico, plomo. El Informe Anual del Manejo Ambiental y Amplio Mejoramiento en Ciudades Claves para Protección Ambiental en el 2003, por parte de la Administración de Protección Ambiental Estatal China, indicaba que Linfen es la ciudad con la peor calidad de aire de toda China. Los altos niveles de contaminación están resultando una pesada carga para la salud de los habitantes de Linfen. Las clínicas locales están viendo crecer los casos de bronquitis, neumonía y cáncer de pulmón. La contaminación por plomo fue también observado como niveles muy altos en niños chinos en la provincia de Shanxi. Los niveles de SO₂ y otras partículas en el aire exceden varias veces los topes estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Hay un número creciente de muertes de residentes en los últimos años que han sido relacionadas directamente con esta intensa contaminación. Otra epidemia encontrada en esta provincial es la Arsenicosis, una enfermedad química ambiental causada por ingerir concentraciones elevadas de arsénico a través del agua. La exposición crónica a este químico tóxico da por resultado lesiones en la piel, enfermedades del sistema vascular periférico, hipertensión, artritis y alto riesgo de cáncer. Un estudio del agua de pozo de Shanxi publicada por Toxicología y Farmacología Aplicada, halló que el nivel de inseguridad del agua de pozo de la provincia era del 52% una estadística alarmante. Datos preocupantes como este han causado que el

Gobierno chino haya admitido abiertamente que uno de cada cinco de sus habitantes carece de agua potable segura. El problema de contaminación ambiental se combina con la dependencia económica de la ciudad en las industrias del carbón, acero y alquitrán, como así también con la necesidad de China por estos recursos para mantener el rápido crecimiento de la economía. El aire de Linfen fue considerado por el Banco Mundial, el año 2008, como el de peor calidad del planeta.

Situación actual y actividad de remediación.—La información referente a remediación y descontaminación del área afectada no está actualmente disponible. Aunque se conoce de la existencia de algunos planes de remediación.

Mailuu-Suu, Kyrgyzstan

En la ciudad hay veintitrés acumulaciones de estériles o pilas de desechos de la mina y trece escombreras de rocas diseminados a todo lo largo de Mailuu-Suu. Estos desechos son el resultado de una primera planta soviética de uranio. Esta planta funcionó desde 1946 a 1968 y produjo y procesó más de 10 000 toneladas de mineral de uranio. Los productos de uranio, al parecer, fueron eventualmente utilizados para fabricar la primera bomba atómica de la Unión Soviética. Lo que queda hoy no son bombas atómicas, pero si 1,96 millones de metros cúbicos de desechos radioactivos de la mina que amenazan todo el valle de Ferghana, una de las áreas más fértiles y densamente pobladas de Asia Central.

Los tipos de contaminantes detectados en diferentes estudios y reportados en las fuentes consultadas son: uranio radioactivo de los desechos del proceso de la mina. Radiación gamma de las escombreras con mediciones entre 100-600 micro-roentgens por hora. Metales pesados, y cianuro.

La población potencialmente afectada es de 23 000 de inmediato y puede haber millones de manera potencialmente. Se dice de manera potencial porque debido a los altos niveles de actividad sísmica en el área, millones de personas en el Asia Central están potencialmente en riesgo si llegara a producirse una falla en los diques de contención de las presas de residuos. Todo ello se fundamenta en las contingencias naturales como movimientos telúricos, deslizamientos de laderas montañosas y aludes de barro, todos ellos tienen el poder de exacerbar los problemas asociados con la ubicación y descontrol ambiental de esos residuos. Se teme que un deslizamiento pueda alterar el equilibrio de una de esas pilas y exponer el material radioactivo que se encuentra en el centro de esas enormes escombreras o derramar parte de ellas en los ríos cercanos. Este temor estuvo cerca de

hacerse realidad en mayo de 2002 cuando un enorme deslizamiento bloqueó un curso del río Mailuu-Suu y amenazó con inundar otro lugar de desechos. En abril del año 2006, el diario *Obschestvenny Reiting* informó que alrededor de 300 000 toneladas de material se derramaron en el río Mailuu-Suu, cercano a las escombreras de la mina, producto de otro deslizamiento. Sucesos como estos pueden contaminar el agua que es bebida por cientos de miles de personas en el valle de Ferghana, que es compartido por Kirgizstan, Uzbekistan y Tajikistan.

El pobre diseño y manejo de las áreas de desechos también permite que materias de estas pilas se transfiera por desmoronamientos a las áreas circundantes. Las investigaciones han encontrado muy altas dosis de radón probablemente debido a la utilización de esta agua que circula por esos desmoronamientos para riego agrícola. Análisis de riesgo ambiental han conducido también a asegurar que la contaminación radioactiva podría ocurrir con nuevos desastres naturales y aseguran que estos podrían conducir a contaminación ambiental en gran escala. En 1998, un estudio realizado por el Instituto de Oncología y Radioecología mostró el doble de residentes que padecieron alguna forma de cáncer que en el resto del país.

Situación actual y actividad de remediación.—

El Banco Mundial ha iniciado un proyecto en Kirgizstan para “minimizar la exposición de los humanos, del ganado y de la flora y fauna ribereñas a radionúclidos asociados con desechos y escombreras abandonadas en minas de uranio en el área de Mailuu-Suu”. El proyecto incluye aislamiento y protección de desechos, mejoramiento del sistema nacional para el manejo, preparación y respuesta en caso de desastres y establecimiento de sistemas de monitoreo y alerta en tiempo real, con estaciones y sensores sísmicos. El costo total del proyecto es de 11,76 millones de dólares de los cuales 6,9 millones serán provistos por el Banco de la Asociación Internacional de Desarrollo, una institución que brinda ayuda a los países más pobres del mundo.

Norilsk, Rusia

Una ciudad industrial fundada en 1935 como campo de labor de esclavos, la siberiana ciudad de Norilsk, la más grande del norte de Rusia y la segunda (después de Murmansk) arriba del Círculo Polar Ártico. De acuerdo a la página web “Minas y Comunidades”, la ciudad es considerada como uno de los lugares más contaminados de Rusia. El color de la nieve es negro, debido a la emisión de partículas sólidas a la atmósfera que precipitan conjuntamente con la nieve y sobre esta, el aire tiene olor a azufre. La ciudad contiene el complejo mundial

más grande de fundición de metales pesados, con una producción de más de 4 millones de toneladas anuales de cadmio, cobre, plomo, níquel, arsénico selenio y zinc. Las emisiones de toneladas de partículas emitidas a la atmósfera son dispersadas en el aire y precipitan sobre la ciudad y alrededores. Las operaciones de extracción y fundición comenzaron en 1930 y es el mayor productor de níquel. “Norilsk Nickel”, una firma recientemente privatizada, es una de las productoras líderes de Rusia de metales no-ferrosos y del grupo de platino. Ella controla una tercera parte de los depósitos mundiales de níquel y contabiliza una porción sustancial de la producción total del país en níquel, cobalto, platino y paladio. Es también la mayor contaminadora, considerada el en el ranking de las empresas de Rusia en términos de contaminación del aire.

La población potencialmente afectada es de 134 000. Las expectativas de vida para los trabajadores son de 10 años menos que el promedio ruso que se estima en el caso de los hombres en 65 años. Los principales contaminantes reportados en diferentes trabajos son: partículas sólidas que incluyen Estroncio-90, Cesio-137, Dióxido sulfúrico, partículas ricas en metales pesados (níquel, cobre, cobalto, plomo, selenio), óxidos de nitrógeno y carbón, fenoles, sulfito de hidrógeno, etc. Debido a su ubicación geográfica, los informes sobre impacto ecológico y contaminación de este lugar son poco frecuentes. En 1999 (Blais, et al., 1999), un informe advirtió concentraciones elevadas en cobre y níquel en el suelo con un radio de hasta 60 km en torno al centro del complejo metalúrgico. La población de la ciudad ha sido afectada por la calidad del aire en esta región de fundiciones, donde se ha mostrado que más de la mitad de todos los ejemplos exceden la concentración máxima permitida por la Organización Mundial de la Salud, tanto para cobre como para níquel. Un informe, en 1995 (Revich, 1995), indicó que se habían observado altos niveles de enfermedades respiratorias en niños alrededor de esta área y ellos están posiblemente relacionados con la actividad de las fundiciones. Las investigaciones, evaluando la presencia de enfermedades de nariz, garganta y oídos entre los chicos en edad escolar que viven cerca a la planta de cobre eran dos veces más propensos a enfermarse que aquellos que habitaban distritos más lejanos. En forma similar, los niños que vivían cerca de la planta de níquel mostraron tendencia a enfermarse en una tasa 1,5 veces más altas que niños que vivían más alejados. Los análisis también indicaron que los problemas en la primera mitad del embarazo de las mujeres como así también nacimientos prematuros, fueron mucho más frecuentes en Norilsk que en las regiones de Taimyr y Kransnoyark. En adición, la mortalidad

por enfermedades respiratorias es considerablemente más alta que el promedio de Rusia, que es del 28 por mil con respecto al 15,8% de todos los fallecimientos entre los niños. Desde Noviembre de 2001, Norilsk ha sido clausurada a los extranjeros, una de las 90 “ciudades cerradas” donde aun persisten los niveles soviéticos de secreto de Estado.

Situación actual y actividad de remediación.—

Muchos grupos, algunos apoyados por donaciones internacionales, han tratado de orientar a los residentes sobre los problemas existentes. En 1980, se trató de mitigar las emisiones mediante la construcción de instalaciones para la eliminación de polvo y gas, como así también precipitadores electrostáticos y remoción de líquidos en estado sulfuroso. Estas tecnologías ayudaron en la reducción de sulfatos, pero los estudios probaron que el daño a los bosques y la concentración de metales permanece como un problema significativo hasta hoy.

Rudnaya Pristan/Dalnegorsk, Rusia

La explotación minera empezó en el año 1930 en estos dos pueblos del Lejano Este de Rusia. Los residentes sufren un serio problema de contaminación por plomo. Esta contaminación proviene de una vieja fundición y del inseguro transporte del concentrado de plomo desde el lugar de ubicación de la mina hasta las zonas de procesamiento y almacenamiento. De acuerdo al más reciente estudio (Kachur et al., 2003, Von Braun et al., 2001, Sharov, 2005), la concentración de plomo en jardines residenciales es 476-4310 mg/kg y en los suelos de los caminos es de 2020-22900 mg/kg, los que exceden los niveles guía establecido por la USEPA en ordenes de magnitud. Esta información podría ser un indicativo de que el agua potable, el polvo de la atmosfera y las plantas del jardín podrían contener también niveles peligrosos de plomo. El agua descargada de las fundiciones promedia los 2.900 m³/día con concentraciones elevadas de plomo y de arsénico (Kachur et al., 2003).

El área contaminada presenta una afectación potencialmente sobre una población de 90 000 habitantes. Los tipos de contaminantes reportados en la literatura e información consultada son: plomo, cadmio, mercurio, antimonio. Los limitados controles iniciales han revelado que los niveles de plomo en sangre de niños son de 8 a 20 veces el máximo permisible en los EE.UU. (EPA). Estimados preliminares bio-cinéticos de niveles importantes de sangre sugieren que los niños en edad preescolar se encuentran en un significativo riesgo de contaminación por plomo, debido a la ingestión de tierra y polvo. Se han determinado valores medios de 13 a 27 microg/dl.

En la emisión anual de partículas sólidas al aire, se han cuantificado una media de 85 toneladas. Se calcula que del total 50 toneladas son de plomo y 0,5 toneladas son de arsénico (Von Braun et al., 2001). A lo largo de de estas 7 décadas de explotación minera, no hay ningún intento de ocuparse del tema de la salud ni por la empresa ni por el Gobierno. De hecho, como Sharov (2005) puntualiza, los residentes del área fueron simplemente abandonados a lidiar por su cuenta con sus problemas de riesgo de la salud y ellos están totalmente ignorantes de esos riesgos. Asimismo, algunos residentes de Rudnaya utilizan viejas baterías de submarinos que fueran recicladas por la fundición para recolectar agua pluvial y con ella regar sus jardines.

Situación actual y actividad de remediación.—

Recientemente, la fundición de plomo ha sido voluntariamente cerrada, después que Backsmith presentó a los propietarios la información sobre los riesgos en la salud de los niños por contaminación con plomo. Adicionalmente, los niveles de plomo en sangre de los niños están siendo analizados y aquellos con niveles elevados están siendo tratados con fondos de Backsmith. Estos fondos también están subsidiando un programa de educación para todos los residentes, y además están en marcha controles y educación local. Lo siguiente es diseñar e implementar un plan para remediar los peores problemas de contaminación.

CONSECUENCIAS ECOLÓGICAS Y SOCIALES DE LA CONTAMINACIÓN MINERO-METALÚRGICA

Como se puede apreciar, las consecuencias ecológicas y sociales son considerables. Por dos razones fundamentales: la emisión de contaminantes al medio afecta los ecosistemas acuáticos y terrestres y la salud de las personas.

CONSECUENCIAS ECONÓMICAS PARA EL SECTOR MINERO-METALÚRGICO

Los daños causados por la ocurrencia de desastres medioambientales asociados a la actividad minero-metalúrgica en la forma de las pérdidas de vidas humanas, la destrucción de la propiedad, la interrupción de las vías de comunicaciones, la contaminación del medio ambiente y las pérdidas económicas para la industria minera y las comunidades y pueblos asociados a esta es enorme. Además, la pérdida de imagen y el rechazo social a esta actividad calificada como contaminante ha dado lugar a problemas sociales, inestabilidad de los gobiernos, e incluso a guerras.

CONTRIBUCIÓN DE LAS CATÁSTROFES A LOS ESTÁNDARES NACIONALES E INTERNACIONALES

Todo ello ha dado lugar a que la Unión Europea haya obligado a todos los sectores productivos a elaborar el documento de las mejores técnicas disponibles (BTA), con vista a reducir estas catástrofes y sus efectos medioambientales. La experiencia en la falla de las estructuras de las presas de residuos de las empresas mineras ha llevado al establecimiento de las normativas europeas sobre residuos de la industria extractiva (2006/21/CE) que ha entrado en vigor en el año 2008 en todos sus estados miembros. La existencia de los problemas medioambientales en Perú y Chile ha llevado a que sean dos países que en estos momentos disponen de la ley de pasivos ambientales mineros.

IV. DISCUSIÓN

En este apartado la pregunta sería: ¿A dónde nos llevan estos desastres y catástrofes medioambientales provocadas por la actividad humana, los desastres naturales o la combinación de ambas?

Para ello, es necesario reflexionar sobre cómo ha evolucionado la vida en la Tierra. Según los conocimientos que se tienen en ella, han ocurrido seis extinciones masivas debido a diferentes causas ambientales o catástrofes naturales:

1. Extinciones masivas del Cámbrico-Ordovícico (488 millones). Durante ese evento desaparecieron muchos braquiópodos y conodontes, también se redujo significativamente el número de especies de trilobites.
2. Extinciones masivas del Ordovícico-Silúrico (444 millones). Su causa probable fue el período glacial.
3. Extinción masiva del Devónico (360 millones). En la transición entre los períodos Devónico y Carbonífero, en el cual el 70% de las especies desaparecieron. Este fue un evento que probablemente duró unos tres millones de años.
4. Extinción masiva del Pérmico-Triásico (251 millones). Cerca de 95% de las especies marinas se extinguieron. Esta fue la catástrofe más grande que ha conocido la vida en la Tierra. Desapareció el 53% de las familias biológicas marinas, el 84% de los géneros marinos y, aproximadamente, el 70% de las especies terrestres (incluyendo plantas, insectos y vertebrados).
5. Extinción masiva del Triásico-Jurásico (200 millones). Eliminó cerca del 20% de las familias biológicas marinas, los arcosaurios no dinosaurios, la mayoría de los terápsidos y los últimos grandes anfibios.

6. Extinción masiva del Cretácico-Terciario (65 millones). Desaparecieron cerca del 50% de todas las especies, incluyendo los dinosaurios.

Según la situación ambiental actual y los resultados de estudios de muchos científicos y comités de expertos internacionales, así como paneles científicos de reconocido prestigio (Jiménez, 2008), se piensa que estamos a las puertas de la sexta extinción masiva del Holoceno, que será causada por el hombre. Todo ello tiene como argumento la existencia de las seis crisis medioambientales que atraviesa el planeta Tierra:

1. El Cambio climático
2. La crisis del agua
3. El agujero de ozono
4. La deforestación masiva
8. La pérdida de la biodiversidad
6. La presión del consumo humano

Estas crisis medioambientales están relacionadas directamente con la actividad antropogénica sobre el medio natural. En mayor o menor medida, todas tienen que ver con las actividades minero-metalúrgicas. A su vez, a nivel global, hay dos elementos que las relacionan entre sí:

1. El ciclo hidrológico
2. El movimiento de las grandes masas de aire.

La combinación de estos elementos anteriormente expuesto nos pone de manifiesto que la situación ambiental requiere de la atención y toma de medidas concretas para paliar sus efectos. Si es que aspiramos al principio de lograr lo que se conoce como el desarrollo sustentable o sostenible y sus tres pilares básicos: lo social, lo económico y lo ambiental.

V. CONCLUSIONES

Como hemos podido observar las catástrofes medioambientales asociadas al sector minero-metalúrgico provocan diferentes tipos de impactos: impactos sobre el medio natural (local, regional, global), impactos sobre el medio social e impactos sobre el sector productivo y la economía. Entre las principales causas de estos desastres hay que señalar: 1) la falta o incorrecto estudio de impacto ambiental (EIA), 2) el fallo de las estructuras de almacenamiento de residuos (instalaciones, presas, escombreras y pilas de lixiviación, etc.), 3) la no aplicación de las mejores técnicas disponibles (BAT) en las explotaciones mineras, 4) errores en el diseño de las instalaciones, 5) el no uso de las medidas de protección adecuadas en función de los riesgos existentes. La magnitud

de estos desastres se ha visto incrementada por varias razones: el comportamiento negligente de las empresas y administraciones, la existencia de poblaciones cercanas, la singularidad y fragilidad ecológica del área de ubicación de las explotaciones mineras, la no existencia en muchos casos de los planes e instalaciones de emergencia, la falta de un plan de ordenación del territorio y la dilatada actividad minera en un área concreta. Todo ello ha dado lugar a que la Unión Europea haya obligado a todos los sectores productivos a elaborar el documento de las mejores técnicas disponibles (BAT), con vista a reducir estas catástrofes y sus efectos medioambientales.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen-Gil, S. M., J. Ford, B. K. Lasorsa, M. Monetti (2003). Heavy metal contamination in the Taimyr Peninsula, Siberian Arctic. *The Science of the Total Environment*, 301: 119-138.
- Alonso E.E. y A. Gens (2006). Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. *Géotechnique* 56(3): 185-201.
- Anatoly N. Kachura, Valentina S. Arzhanovaa, Pavel V. Yelpatyevskya, Margrit C. von Braunb, Ian H. von Lindern (2003). Environmental conditions in the Rudnaya River watershed a compilation of Soviet and post-Soviet era sampling around a lead smelter in the Russian Far East, *The Science of the Total Environment*, 303: 171-185.
- Blais, J. M., K. E. Duff, T.E. Laing, J.P. Smol (1999). Regional contamination in lakes from the Noril'sk region in Siberia, Russia. *Water Air Soil Pollut.* 110(3-4): 389-404.
- Blight, G. E. y A. B. Fourie (2003). A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. *Int. Workshop On Occurrence And Mechanisms Of Flow In Natural Slopes And Earthfills*, Sorrento, Italia.
- Blight, G. E. (1994). The master profile for hydraulic fill tailing beaches. *Proc. Instn. Civ. Engng*, 107: 27-40.
- Blight, G. E. (1997). Destructive mudflows as a consequence of tailing dyke failures. *Proc. Instn. Civ. Engng*, 125: 9-18.
- Burton, B. (2006). BHP admits Ok Tedi mine is environmental disaster». *Asia Times Online*. Ok Tedi Mining. Retrieved on 2006-09-17.
- Cánovas, C.R., Olías, M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Cerón, J.C. (2006). "Hydrogeochemical characteristics of the Tinto and Odiel rivers (SW Spain). Factor controlling metal contents", *Science of the Total Environment*. (In review).
- Chandler, R. J. y G. Tosatti (1995). The Stava dams failure, Italy, July, 1985. *Proc. Instn. Civ. Engng*, 113: 67-79.
- China Internet Information Center (2006). "Rivers Run Black in Shanxi Province". *China Daily*. July 17, 2006.
- Crisis Deepens in La Oroya" Oxfam America. (2004) December 20.
- Environment News Service (ENS) (2004). Kyrgyz Republic Funded to Secure Uranium Waste Dumps. *Mines and Communities Website*. June 17.
- Fourie, A. B. y G. Papageorgiou. (2001). Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings. *Can. Geotech. J.*, 38, 695-706
- Fourie, A.B., G.E. Blight y G. Papageorgiou (2001). Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Can. Geotech. J.*, 38: 707-719.
- Harder, L.F. y Stewart, J.P. (1996). Failure of Tapo Canyon Tailings Dam. *J. of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 10(3): 109-114.
- http://english.people.com.cn/200407/14/eng20040714_149521.html
- http://enrin.grida.no/case_studies/nucFergana/kyrgyz_12.pdf
- <http://news.bbc.co.uk/2/hi/africa/3241037.stm>
- <http://newsfromrussia.com/world/2003/04/21/46158.html>
- <http://www.asiawaterwire.net/node/74>
- <http://www.blacksmithinstitute.org/kabwe.shtml>
- http://www.cdc.gov/nceh/ehs/Docs/la_oro_ya_report.pdf
- <http://www.china.org.cn/english/environment/174874.htm>
- http://www.chinadaily.com.cn/english/doc/2004-07/15/content_348397.htm
- <http://www.irinnews.org/report.asp?ReportID=46641&SelectRegion=Asia&SelectCountry=KYRGYZSTAN>.
- <http://www.irinnews.org/report.asp?ReportID=46933&SelectRegion=Asia>
- <http://www.minesandcommunities.org/Action/press375.htm>
- <http://www.nuestroclima.com>
- <http://www.osce.org/item/181.html>

31. http://www.oxfamamerica.org/newsandpublications/.../news_update.2004-12-20.4019587716
32. <http://www.theworld.org/?q=node/4059>
33. Jiménez, F. (2008). La sexta extinción. La mayor amenaza de la Tierra es la humanidad. Editorial Zenith/Planeta. 326 pp.
34. Kachur, A. N., V. S. Arzhanova, P. V. Yelpatyevsky, M. C. von Braun, and I.H. von Lindern (2003). Environmental conditions in the Rudnaya River watershed a compilation of Soviet and post-Soviet era sampling around a lead smelter in the Russian Far East". *The Science of The Total Environment*, 303(1): 2171-185
35. Kirsch, S., Fall. (1996). Cleaning up Ok Tedi: Settlement Favors Yonggom People. *Journal of the International Institute*. Scholarly Publishing Office of the University of Michigan Library. Retrieved on 2008-03-02.
36. Kirsch, Stuart 2006-07. *Reverse Anthropology: Indigenous Analysis of Social and Environmental Relations in New Guinea*. Stanford University Press; pp 272. ISBN 0-8047-5342-3.
37. Kleinmann, R.P.L., 1989. Acid mine drainage in the United States. Controlling the impact on streams and rivers, en 4th World Congress on the Conservation of the Built and Natural Environments, Toronto, pp. 1-10.
38. Kristin Aunan, Jinghua Fang, Haakon Venemo, Kenneth Oye, Hans M. (Sep. 2004). Co-benefits of climate policy-lessons learned from a study in Shanxi, China." *Energy Policy*. 32(4):567-581
39. Leteinturier, B., J. Laroche, J. Matera, and F. Malaisse (2001). Reclamation of lead/zinc processing wastes at Kabwe, Zambia: a phyto-geochemical approach. *South African Journal of Science* 97 Nov/Dec 624-627.
40. Li, Y. F., Y. J. Zhang, G. L. Cao (1999). Distribution of seasonal SO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in the Shanxi province. *Atmospheric Environment (Oxford, England)* (Jan. '99) 33(2): 257
41. Moya, J. (2001). Determinación de la geometría de la superficie de rotura en deslizamientos instantáneos: el caso de la balsa minera de Aznalcollar. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid, 27-30 Noviembre de 2001, 3: 1341-1352.
42. Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Olías, M., Cánovas, C.R., Riba, I., Kalman, J., Delvalls, T.A. (2006). Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva estuary, *Environmental International* (In press).
43. Nocete, F., Alex, E., Nieto, J.M., Sáez, R., Bayona, M.R. (2005). An archaeological approach to regional environmental pollution in the south-western Iberian Peninsula related to Third millenium BC mining and metallurgy, *Journal of Archaeological Science* 5(32): 1566-1576.
44. Nurlan Djenchuraev., 1999. Current Environmental issues associated with mining wastes in Kyrgyzstan. Master of science. Department of Environmental Sciences and Policy of Central European University.
45. Olalla, C. y Cuellar, V. (2001). Failure mechanism of the AznalcoÁllar Dam, Seville, Spain. *Geotechnique*, 51(5): 399-406.
46. Oldecop, L., R. Rodríguez (2007). Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. *Ingeniería Civil*, 148: 181-189.
47. Olías, M., Cánovas, C.R., Nieto, J.M. and Sarmiento, A.M. (2006). Evaluation of the dissolved contaminant load transported by the Tinto and Odiel rivers (South West Spain), *Applied Geochemistry* 21: 1733-1749.
48. People's Daily Online (2004). "Environmental quality stable in general: report". July 14, 2004.
49. Qin Jize (2004). Most polluted cities in China blacklisted." *China Daily*. (2004) July 15.
50. Revich, B. A. (1995). Public health and ambient air pollution in Arctic and Subarctic cities of Russia". *The Science of the Total Environment*.160/161: 585-592.
51. Safety of Uranium Dumps in Kirghizia Calls For Attention of International Community" *Pravada* (2003) April 21.
52. Sarah MacGregor. "Finding a Solution for Uranium Waste in Kyrgyzstan." *OSCE*. (2004) February 4.
53. Sharov P.O. (2005). Lead Contamination of Environment in Rudnaya Pristan, Russia and associated Health Risks. *Far Eastern Health Fund. Vladivostok Dalnauka*.
54. Sun. G. (2004). Arsenic contamination and arsenicosis in China." *Toxicology and Applied Pharmacology*. 198: 268-271.
55. Tembo, B. D., K Sichilongo, J. Cernak (2006). Distribution of copper, lead, cadmium, and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia. *Chemosphere*, 63: 497-501.

56. The Epoch times (2006). "The Most Polluted City in the World: Sixteen of the 20 most polluted cities in the world are in China." The Epoch times. (2006) June 10, 2006. (refers to air pollution and particulates). <http://www.theepochtimes.com/news/6-6-10/42510.html>
57. Vandenhove, H., L. Sweeck, D. Mallants (2006). Assessment of radiation exposure in the uranium mining and milling area of Mailuu Suu, Kyrgyzstan". *Journal of Environmental Radioactivity* 88: 118-139.
58. Vasiliev, I. A., D. S. Barber, V. M. Alekhina (2005). Uranium levels in the Naryn and MAiluu-Suu rivers of Kyrgyz Republic. *Journal of Radio-analytical and Nuclear Chemistry*. 263: 207-212.
59. Von Braun, M. C., I. H. von Lindern, N. K. Khristoforova (2001). Environmental lead contamination in the Rudnaya Pristan Dalnegorsk mining and smelter district, Russian far East. *Environmental Research Section A*. 88: 164-173.
60. Wagener, F., Craig, H.J., Blight, G.E., McPhail, G., Williams, A.A.B., and Strydom, J.H. (1998). The Merriespruit tailings dam failure - a review. In *Proceedings of the Conference on Tailings and Mine Waste '98*, Colorado State University, Fort Collins, January 1998, pp. 925-952.
61. Wang, S-g, J-l Zhang (2004). Blood lead levels of children in China. *Environmental Sciences and Pollution Mgmt*. 21(6): 355-360.
62. Youd, T. L. (1972). Compaction of sands by repeated shear straining. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98, SM7, 709-725.
63. Zubareva, O.N., L. N. Skripal'shchikova, N. V. Greshilova, and V. I. Kharuk. (2003). Zoning of landscapes exposed to technogenic emissions from the Norilsk Mining and Smelting works. *Russian Journal of Ecology*, 34(6): 375-380.