Minería Ambiental

Una introducción a los Impactos y su Remediación

Roberto Oyarzun, Pablo Higueras & Javier Lillo



Ediciones GEMM - Aula2puntonet

2011

Minería Ambiental: Una Introducción a los Impactos y su Remediación

Roberto Oyarzun

Departamento de Cristalografía y Mineralogía
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense
Madrid — España

✉ oyarzun@geo.ucm.es

Pablo Higueras

Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
EIMI Almadén
Universidad de Castilla-La Mancha
Almadén — España

✉ pablo.higueras@uclm.es

Javier Lillo

Departamento de Biología y Geología
Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología
Universidad Rey Juan Carlos
Móstoles — España

✉ javier.lillo@urjc.es

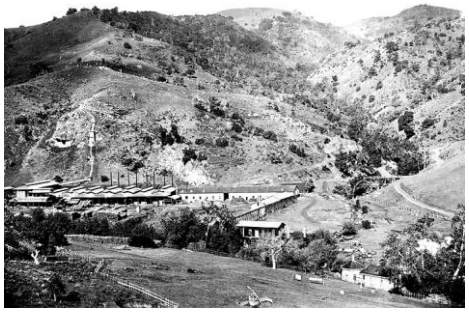
Control de Edición & Internet: Roberto Oyarzun & Paloma Cubas
GEMM - Aula2puntonet: www.aulados.net/GEMM/GEMM.html

Bajo Licencia Creative Commons (2011) Reconocimiento No Comercial (by-nc):

Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. En cualquier explotación de la obra autorizada por la licencia hará falta reconocer la autoría.

***Imagen portada**: Night Mining, Alexander Svensson, www.flickr.com/photos/svensson/4830482182/*

Roberto Oyarzun completó sus estudios de geología en la Universidad del Norte (Chile) el año 1975. Trabajó los primeros años en exploración de yacimientos minerales en el norte de Chile, en El Salvador para CODELCO (Prospecto Kilómetro 14) y luego en la Cordillera de Domeyko, para un Proyecto de SERPLAC. Posteriormente se trasladó a la ciudad de Concepción donde fue profesor en la universidad del mismo nombre. En 1980 se desplazó a Inglaterra, a la Universidad de Leeds , donde obtuvo su PhD en 1982. En 1986 se radicó en Madrid (España), donde se vincularía con el pasar de los años de manera permanente a la Universidad Complutense, en el Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Facultad de CC Geológicas, donde es actualmente Profesor Titular. Aunque comenzó su carrera en el mundo de la exploración, paulatinamente se ha ido incorporando al tema ambiental. Mantiene no obstante fuertes intereses en los campos de la geología de minas, geología estructural, vulcanismo, y por supuesto, en la geología de campo, de la que es profesor. Junto con Paloma Cubas mantiene las páginas web de Aula2puntonet y el GEMM. Roberto Oyarzun es además colaborador externo del IGeA de la Universidad de Castilla – La Mancha.



*La antigua mina de mercurio de New Almadén (California) ca. 1863**

Pablo Higueras es Licenciado (1981) y Doctor (1993) en Ciencias Geológicas por la Universidad de Granada (España). Desde 1981 hasta 1985 trabajó en una empresa de consultoría sobre geología y minería en Córdoba (España), y entre 1985 y 1990 en una empresa minera, en Almadén (Ciudad Real, España). Desde 1990 es profesor del Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), con destino en la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén, donde es actualmente Catedrático de Universidad del Área de Prospección e Investigación Minera. Su actividad profesional se desarrolla fundamentalmente en los campos de la geología minera, metalogenia y geoquímica. A partir del año 2000 se involucra en la temática ambiental del mercurio, así como de otros metales pesados liberados al medio ambiente en relación con las actividades mineras y afines. Desde el año 2010 es además Director del Instituto de Geología Aplicada (IGeA) de la UCLM, dirigiendo numerosos proyectos financiados por entidades públicas con el objetivo fundamental de establecer criterios para caracterizar adecuadamente los resultados de la contaminación inducida por la minería, y buscar posibles soluciones para ésta.

Javier Lillo concluyó sus estudios de Ciencias Geológicas en la Universidad Complutense de Madrid (España) el año 1985. Trabajó los primeros años para la Empresa Nacional Adaro de Exploraciones Mineras y como profesional libre, realizando tareas de exploración minera y cartografía geológica en el Macizo Varisco español. En 1988 se traslada a la Universidad de Leeds, en Inglaterra, donde obtuvo su PhD en 1993. En 1991 comienza a trabajar en la Compañía General de Sondeos S.A., donde participa en proyectos sobre emplazamiento geológico profundo para residuos de alta actividad, cartografía geológica y geología ambiental. Desde 1999 es profesor en la Universidad Rey Juan Carlos, actualmente como Profesor Titular en el Departamento de Biología y Geología de la Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología. Su actividad investigadora de los últimos años se centra en diferentes aspectos de geología ambiental, fundamentalmente relacionados con mineralogía, geoquímica e hidrogeología, enfocados a la caracterización de medios afectados por la actividad humana y al diseño de tecnologías que permitan la conservación de los recursos hídricos. Desde 2005 es codirector del Master Universitario de Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos (Universidad de Alcalá-Universidad Rey Juan Carlos). Javier Lillo es además colaborador externo del IGeA de la Universidad de Castilla – La Mancha.

**: Imagen: New Almadén (California). Fuente: California Geography Basic Themes; http://www.geog.ucsb.edu/~joel/g148_f09/lecture_notes/intro/new_almaden_1863.jpg*

INDICE (*con enlaces a los capítulos*)

1. MINERÍA E IMPACTOS AMBIENTALES

1.1 La minería, principales características de una actividad industrial singular *1*
1.2 Definición de impacto ambiental *4*
1.3 Clasificación de los impactos derivados de la actividad minera *10*
1.4 Modificaciones del entorno, una primera visión sobre el tema *16*

2. LAS RAICES DEL PROBLEMA

2.1 La actividad minera extractiva *30*
2.2 El procesado de minerales *38*
2.3 Procesado de minerales y problemas ambientales *42*
2.4 Problemas ambientales de la minería no metálica *53*
2.5 La minería aluvial del oro, demagogia ambientalista y pobreza *57*

3. COMPARTIMENTOS AMBIENTALES IMPACTABLES

3.1 Atmósfera y contaminación *64*
3.2 Suelos, receptores universales de la contaminación *91*
3.3 Aguas, un medio receptor e inductor de impactos *124*

4. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO Y CORRECCIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

4.1 Proyectos mineros y el estudio de impacto ambiental *151*
4.2 La investigación de línea base *158*
4.3 La "lista" de impactos ambientales potenciales de un proyecto minero *171*
4.4 Mitigación de impactos mediante medidas correctoras *187*
4.5 Evaluando y (en lo posible) recuperando zonas "catastróficas" *217*

5. CASOS DE ESTUDIO

5.1 El Distrito Minero de Almadén, un caso de contaminación milenaria por mercurio *240*
5.2 Estudiando cuencas hidrográficas en Chile, fallos y aciertos *272*
5.3 Cuando preservar un "desastre" podría ser (muy) educativo *291*

6. EPÍLOGO: CUANDO EL FUTURO NOS ALCANCE

6.1 Pasado imperfecto *317*
6.2 Minería y sostenibilidad ¿la cuadratura del círculo? *319*

ANEXO 1: TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA
Desarrollo de técnicas activas y pasivas para el control del drenaje ácido *323*

ANEXO 2: RESTAURANDO ESCOMBRERAS
La integración paisajística de escombreras *330*

ANEXO 3: IMPACTOS Y ATENUACIÓN NATURAL
Cuando "puede" que los problemas no sean "tan" graves *335*

1. MINERÍA E IMPACTOS AMBIENTALES

1.1 La minería, principales características de una actividad industrial singular

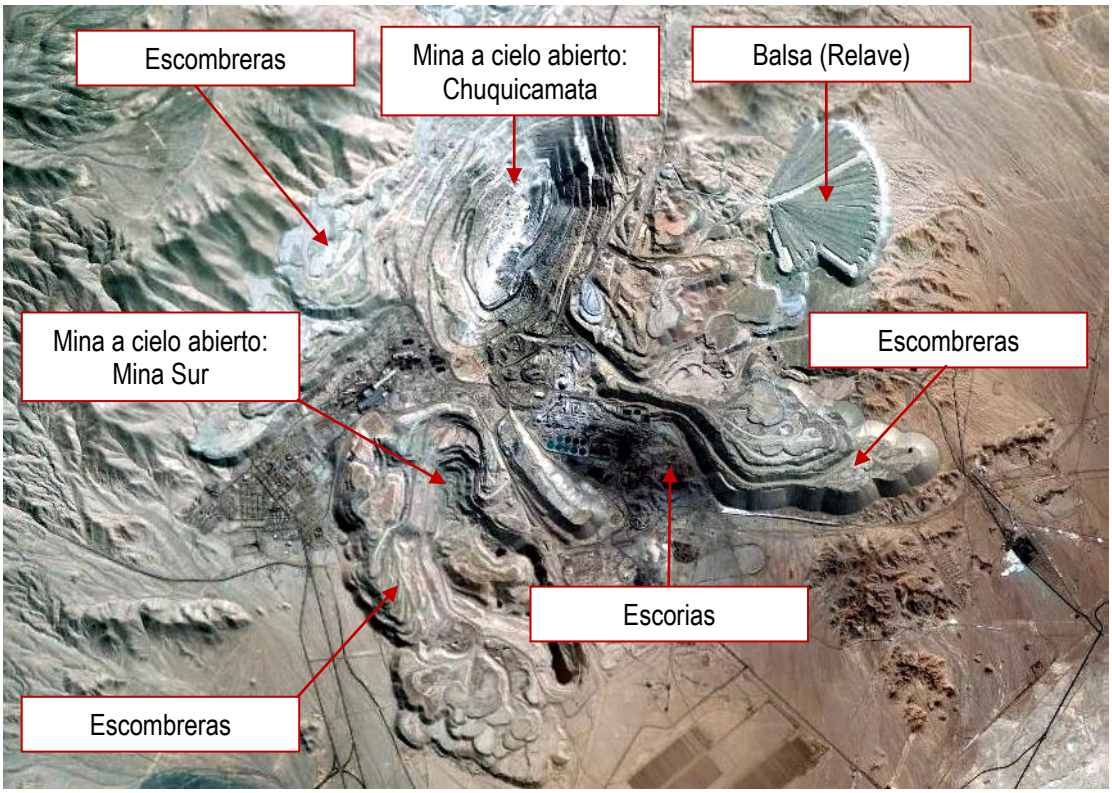
Existen tres razones principales que hacen de la minería una actividad industrial singular:

1. El valor "localizado" de los yacimientos minerales, esto es, un yacimiento "sólo" puede ser explotado en el lugar donde se encuentra. Parece obvio, pero a veces se olvida que si se explotaba mercurio en Almadén (España) era porque allí y no en cualquier otro sitio se encontraban los mayores yacimientos de este metal; de la misma manera, si se explota cobre y molibdeno en Chuquicamata (Chile) es porque allí hay concentraciones de estos de estos metales con la suficiente entidad (reservas y leyes) como para que esta explotación entregue un beneficio económico.
2. El segundo factor que hace que la minería sea singular es la "temporalidad" de las explotaciones. Un yacimiento se explota mientras tiene "reservas", es decir, suficiente cantidad de mineral o roca, y de suficiente calidad, como para que la explotación genere un beneficio económico que la haga viable. Cuando esto deja de ocurrir, por agotamiento de las reservas, porque la calidad del mineral o roca extraído disminuye, o incluso por circunstancias del mercado de ese producto (disminución de su demanda y por tanto de su precio), la minería cesa.
3. Los residuos que genera la actividad minera son inmensamente más grandes que los productos económicos que genera. En el caso de una explotación de cobre de un yacimiento con ley 1% Cu, de una tonelada de roca mineralizada solo se extraerán (en un caso perfecto que no existe) 10 kg de cobre. Esto significa que 990 kg serán residuos.

Solo con esto ya tenemos un sinnúmero de problemas relacionados. Primero, los altos costes de exploración en que tienen que incurrir las empresas; segundo, el que a pesar de contar con una masa mineral económica esta no pueda ser explotada debido a su localización por cuestiones geopolíticas (zona conflictiva) o ambientales (zona protegida); tercero, el qué hacer con la ingente cantidad de residuos mineros generados por la extracción en sí y el procesado de los minerales.



Mina Escondida (Chile), donde se pueden apreciar los inmensos volúmenes de escombreras (residuos) de roca estéril o material subeconómico (imagen[1]).



Complejo minero-metalúrgico de Chuquicamata (Chile). La imagen cubre unos 15 km en dirección E-W. Norte hacia arriba. Imagen Google Earth.

¿Por qué los residuos son importantes? Porque ocupan grandes espacios y son potencialmente peligrosos bajo un punto de vista físico y químico. En otras palabras, generan un impacto ambiental. A estos impactos deberíamos sumar aquellos generados por las fundiciones de metal en los complejos minero-

metalúrgicos. En este sentido, tanto los gases como el particulado aéreo asociado que sale por las chimeneas pueden tener graves consecuencias para la salud de quienes viven en las inmediaciones.

Oyarzún y Oyarzun (2011) muestran un caso notable tipificado por la fundición Bunker Hill, Idaho (Distrito Minero de Coeur d'Alene). En 1973 el sistema de filtros de la chimenea dejó de funcionar durante un período de gran bonanza de precios. Los ejecutivos de la empresa prefirieron continuar las operaciones contaminando gravemente la atmósfera con plomo y causando un fuerte daño neurológico a la población, en particular a los niños, más susceptibles a este tóxico.

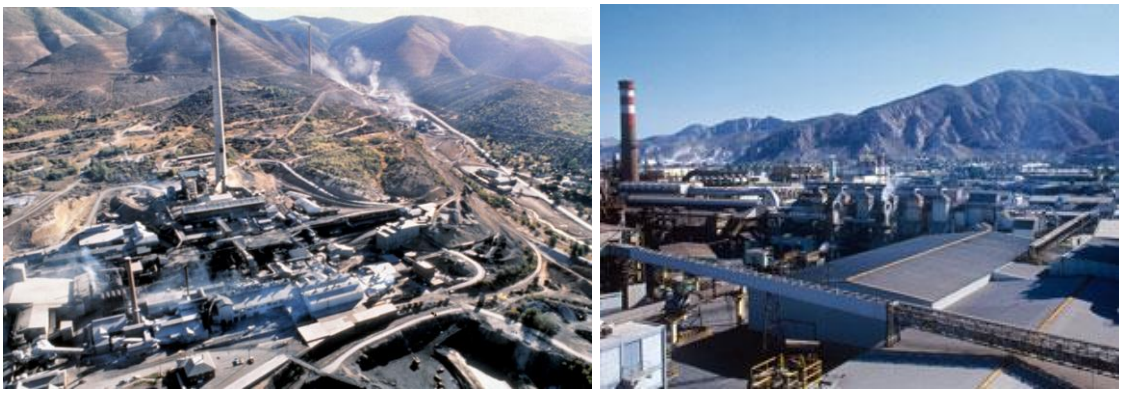
Dusty brown mountains surround Torreón, a big industrial city in the north of Mexico. But one sandy desert hillside shines jet-black. The cerro negro ("black hill"), as it is known locally, is composed of deposits from Latin America's largest non-ferrous metal smelter, which has blackened the air for more than a century. The plant has created not just an ugly slag heap but a public-health problem whose true extent is still unknown.

The smelter, owned by Met-Mex Peñoles, part of a big Mexican mining group, ran without a roof from 1901 until 2000, blanketing the surrounding area with layers of fine black powder. That mattered less when the smelter was isolated in the desert. But in the 1970s Mexico's government sold plots of land it owned next to the plant for housing.

Even then, the dirt was seen as an inconvenience, outweighed by the jobs that the plant brought. But in 1998 Manuel Velasco, a local paediatrician, noticed a pattern among his patients. Many children had more than 60 micrograms of lead per decilitre of blood, six times the level that the Centres for Disease Control (CDC), an American government agency, says should prompt public action. "After the fourth case, I knew something was very wrong," Dr Velasco says.

The Economist (2011)

Un caso similar se ilustra en la caja de arriba a la derecha, con la fundición de Peñoles (México), donde los niños también han sido afectados por contaminación con plomo (The Economist, 2011).



A la izquierda, La fundición de Bunker Hill (ca. 1984), en el Distrito Minero de Coeur d'Alene (USA); a la derecha, fundición Met-Mex Peñoles, en Torreón (México) (imágenes[2,3]).

1.2 Definición de impacto ambiental

1.2.1 Ideas fundamentales

Se entiende por impacto ambiental el efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse a los efectos de un fenómeno "natural" catastrófico. Así podríamos hablar de "impacto ambiental" como la diferencia entre lo que había y lo que hay después de una actividad humana o fenómeno natural. Sin embargo, a efectos de esta obra, hablaremos de impacto ambiental solo en los casos en los que la diferencia la marca una actividad humana (*antrópica*).

Tras esta definición subyace la filosofía de que la mayor parte de las actividades del hombre (por no decir la totalidad) afectan el medioambiente en mayor o menor grado.



Bosque arrasado (derecha) en la Provincia de Alberta (Canadá) para la explotación minera de arenas bituminosas (imagen[4]).

Por su parte, la minería es una de las actividades humanas con mayor potencial para afectar al medioambiente. Sin embargo, los impactos de otras actividades como la agricultura, que ha modificado mucho más profundamente la cubierta vegetal de la mayor parte del planeta, o la construcción de ciudades, han generado impactos aun mayores, sobre todo en cuanto a la superficie afectada por el fenómeno y pérdida en biodiversidad.

Son notables en la actualidad la transformación de la selva tropical en Indonesia para la plantación de palma para la obtención de aceite, o soja en Brasil en las regiones amazónicas.



Bosque de selva tropical arrasado en Indonesia para la plantación de palma para la producción de aceite (imagen[5]).

Esta afirmación nos lleva a otras cuestiones, como la mayor o menor necesidad de llevar a cabo una actividad. Eso sí, tomemos en consideración el hecho de que sin agricultura intensiva no se podría alimentar a la humanidad, sin ciudades seguiríamos viviendo en las cavernas.





Izquierda, bosque talado para la producción de carbón de leña en Tanzania (Rowan, 2009); a la derecha, camión cargado con carbón de leña en Togo (imagen[6]).

Podemos considerar los cambios como adversos o benignos. Evidentemente, todo cambio que se lleve a cabo en el medio ambiente es adverso para éste en su conjunto, puesto que supone una alteración de las condiciones iniciales, y afectará a la flora y fauna del medio, o a su configuración fisiográfica o paisaje en mayor o menor grado. Incluso nuestros antepasados cavernícolas necesitaban leña para

hacer fuego, lo que implica la tala de árboles, afectando a los pájaros que nidifican en ellos. En este sentido, innumerables comunidades rurales en el mundo siguen necesitando leña para cocinar sus alimentos.

1.2.2 Sobre la importancia socioeconómica de la actividad minera

Aceptando la "necesidad" de tener que afectar al medio, el concepto que nos permite dar por buena esta afectación es el de "sostenibilidad". Esto es, que se afecte al medio de tal forma que se cubran adecuadamente las necesidades humanas, sin que ello suponga la desaparición de las características propias del medio afectado, ni ponga en jaque el bienestar de las futuras generaciones. A esto último lo llamamos "equidad intergeneracional".

La minería es una actividad necesaria, más que necesaria, ya que si queremos desarrollar la agricultura (tan necesaria en sí misma) o la pesca, si queremos vivir en ciudades y no en cavernas, necesitamos unas herramientas, unas materias primas, necesitamos unos aditivos para el suelo, que hagan posible estas actividades humanas. Además de estas necesidades "básicas" existen otras como las energéticas, de salud, educacionales, patrimoniales, etc., en una población mundial en continuo crecimiento. Lo cierto es que las necesidades a cubrir incluyen una larguísima lista de materias primas que se extraen de la Tierra. Digámoslo así, todo lo que no se cultiva, caza o pesca hay que obtenerlo a través de la minería. Estas materias primas tienen que ser extraídas y tratadas mediante procesos más o menos complejos. Por ejemplo, el cobre se extrae en forma de compuestos

In today's society transition metals are in their highest demand ever. Steel is used to make bridges, buildings, and even works of art. Almost all of the skyscrapers have steel skeletons. Steel can not only be used independently; it can be mixed with other compounds or elements, such as carbon to give certain effects. If you add less than .15% carbon the alloy is ductile like iron wire. If the percentage is between .15 - .25% the alloy is much stronger. This alloy is used to make cables, chains, and nails. If the percentage is between .20 - .60% the alloy is mostly used for girders, rails, and structural purposes. If the percentage is .61 - 1.5% it is considered high-carbon steel. This is used to make knives, razors, cutting tools, and drill bits. As you can tell it takes only small changes in the concentration of ingredients to make large changes in the characteristics of the alloy.

Metals are also the key ingredient in automobiles because of their strength, durability, and extreme resistance to heat and fire. Metals are used to make bicycles, electrical toothbrushes, wires, refrigerators, and anything else that has metal parts. Anything that needs electricity has metal components because metals are electrical conductors. Battery casings, scissors, and microwaves are a few more examples of objects that are made from metals.

… We also use transition elements in many other ways. They are the key to making different colored paints, photo reactive eye glasses, and mercury thermometers. Titanium is used to detect underwater sound. Barium titanate is piezoelectric, which means that it generates an electrical charge when it is mechanically distorted. When the sound wave hits the compound it mechanically vibrates generating an electrical signal. Some like iron, cobalt, and nickel produce a magnetic effect called ferromagnetism and are used for permanent magnets and magnetic devices …

… Things like copper indium diselenide (CIS), and cadmium telluride (CdTe) can be found in photovoltaic solar cells used to convert solar energy into heat energy and eventually it is converted into electrical energy.

Bates (2009)

(minerales) del elemento, así que está ligado a otros elementos químicos de los que hay que separarlo.




Metales como el hierro, el cobre, el zinc y el aluminio (entre otros) son fundamentales para la construcción de la maquinaria agrícola y los barcos de pesca (imágenes[7,8]).

Por otra parte, lo cierto es que los responsables de la industria minera, como los de tantas otras actividades humanas, no han sido conscientes hasta fechas relativamente recientes de la necesidad de que las actividades sean ambiental, social y económicamente sostenibles. Para empezar es necesario que el impacto que genera la minería en el medio se reduzca drásticamente durante la operación extractiva y en especial tras el cierre de la actividad.

1.2.3 Minería y medioambiente: cuando las minas son abandonadas sin más

Comentábamos al comienzo el factor de temporalidad de la actividad minera, que también podríamos denominar aquí, de "caducidad" de la actividad. En el momento en que se han extraído por los medios tecnológicos del momento todas las reservas explotables de mineral, esta actividad cesa, y si los cálculos se han hecho correctamente, se puede prever (en cierta medida) cual será la vida útil de una mina. Sin embargo existen factores aleatorios que pueden alterar los pronósticos y entre estos se encuentran:

- Las fluctuaciones en los precios de mercado del o los metales explotados.
- La entrada en vigor de medidas de protección ambiental que hacen inviable la operación económica de una mina.
- Escenarios bélicos de alta o baja intensidad.
- Fenómenos naturales catastróficos.

Si la actividad minera ha cesado se puede llegar a una situación en la que tras algunos meses o años, la mina se degrade hasta un punto que la empresa no ve viable ni recuperarla ni recuperar el medio afectado por sus actividades. Este ha sido el caso de un gran número de explotaciones que se han producido en el mundo en general y en España en particular. Muchas explotaciones estuvieron activas en tiempos de los romanos, quienes las abandonaron en un momento dado

por causas diversas, desde el agotamiento de reservas al descubrimiento en proximidad de otros yacimientos mejores. Tras la época romana la mayor parte de las explotaciones quedaron inactivas hasta el Siglo XIX, cuando las demandas de metales para la industria aumentaron el precio de los mismos y el mundo empresarial volvió a considerar esta importante oportunidad de negocio. Sin embargo, de nuevo se trató de algo pasajero, esto es, se explotaba mientras "era rentable", por la riqueza del yacimiento, o el nivel de los precios. Cuando la rentabilidad disminuía se paraba la explotación esperando "tiempos mejores" que a veces no llegaban. Esto explica el legado de minería abandonada de nuestro país y de tantos otros.



Algunos distritos mineros abandonados en España. Arriba izquierda, Mazarrón (Murcia), con residuos extremadamente ricos en Pb-Zn y As; a la derecha, Rodalquilar (Almería), pila de lixiviación rica en As junto a explotación agrícola; abajo, drenaje ácido de una balsa (relave) en San Quintín (Ciudad Real).

En la actualidad esta cuestión está en parte resuelta mediante la implantación de los llamados "planes de cierre" (Oyarzún, 2008; Oyarzún y Oyarzun, 2011), que obligan contractualmente a la recuperación de las zonas afectadas por la minería, so pena de fuertes multas. Como esto puede no ser suficiente, las empresas que se plantean llevar a cabo una explotación minera en España deben hacer frente a una cuantiosa fianza. Esta no se reintegra hasta que no ha culminado el proceso de recuperación ambiental definido en el "plan de actuaciones" que debe aprobar la administración previamente al inicio de las labores.



Actuaciones relacionadas con el plan de cierre de las labores minero-metalúrgicas de El Indio (Chile) (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Trabajos del cierre de la balsa (relaves). Debido a la climatología de la región (que cada 4 o 6 años se enfrenta a episodios de El Niño), el diseño de la balsa (aguas arriba) y el estrecho encajonamiento del valle, es probable que la balsa continúe siendo un riesgo permanente (imágenes[9]).

1.3 Clasificación de los impactos derivados de la actividad minera

Los impactos ambientales y socioeconómicos de la minería se pueden clasificar de muy diversas formas que analizaremos a continuación.

1.3.1 Según sea un impacto directo o indirecto sobre el medio

En los impactos directos destacaremos las emisiones de gases, fluidos, ruido, polvo, impacto visual; en tanto que en los indirectos tenemos los socioeconómicos, riqueza para algunos y cierto beneficio a la comunidad (infraestructuras), pobreza a otros, expropiaciones, tensión social, etc. Lo mínimo como impacto directo que generará una actividad minera es polvo:

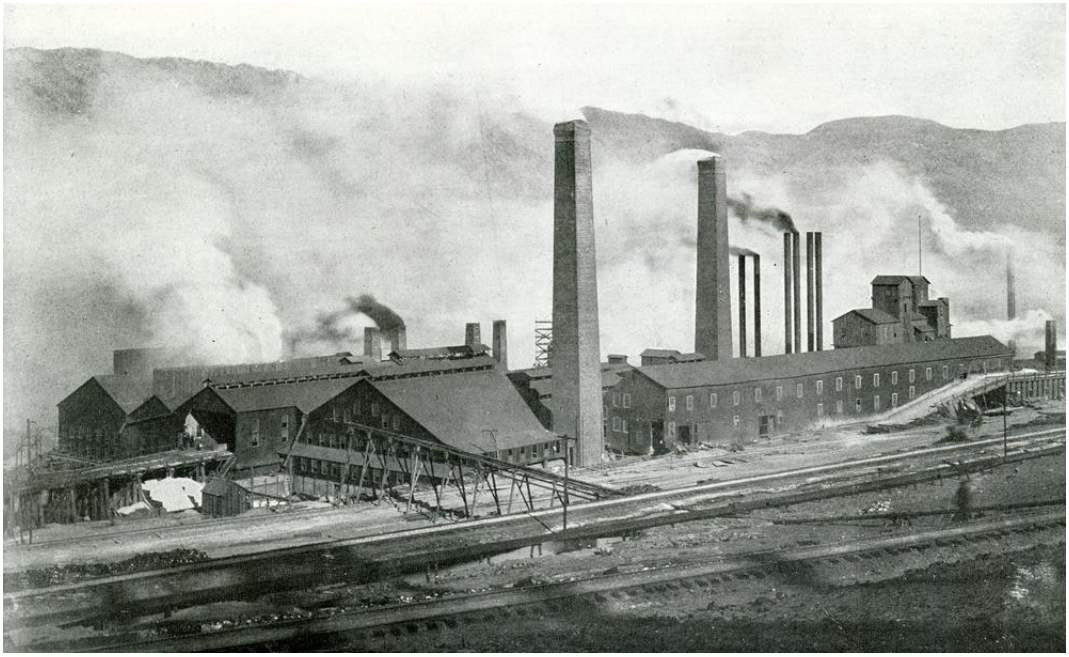
1. Como producto del tráfico de camiones y otras maquinarias pesadas sobre pistas de tierra.
2. Como producto de los procesos de voladura de roca si la minería es a cielo abierto.

El polvo no debe ser considerado como una inconveniencia más, algo desagradable pero carente de peligro, ya que en concentraciones elevadas puede tener consecuencias de salud pública para los trabajadores de la mina y personas que vivan en centros urbanos cercanos a la explotación.



Generación (inevitable) de polvo en Mina Sur (A-C) y Radomiro Tomic (D). Distrito Minero de Chuquicamata (Chile). Las condiciones de sequedad del medio (desierto) agravan el problema.

Por otra parte, las operaciones de procesado de minerales generan importantes emisiones de gases y efluentes químicos. Los primeros se derivan principalmente de la fundición de sulfuros, que inducirá la formación de dióxido de azufre (SO_2) que parcial o completamente escapará por las chimeneas de la planta de fundición. El dióxido de azufre, aparte de su toxicidad intrínseca al ser inhalado por los seres vivos, genera además la formación de la llamada lluvia ácida.



La fundición de cobre de Butte (Montana; USA) hacia 1900, cuando los temas ambientales ni siquiera existían a escala conceptual (imagen[10]).

En cuanto a efluentes químicos estos se relacionan preferentemente con la oxidación de sulfuros y la subsecuente lixiviación de metales pesados a partir de escombreras o balsas (relaves) de mineral. Dado que el principal mineral en yacimientos sulfurados es la pirita (FeS_2), la oxidación y lixiviación de esta da lugar a la formación del denominado drenaje ácido de mina, comúnmente de un marcado color rojo o anaranjado.



Drenaje ácido de mina en San Quintín (Ciudad Real; España).

En cuanto al ruido, este solo será notable en las inmediaciones de la mina y dado que en los tiempos modernos no pueden coexistir espacialmente minas y poblados, se trata de un problema que afecta principalmente a quienes trabajan en la mina y sus instalaciones.

Por su parte, el impacto visual de las minas será mínimo a ras de suelo aunque grande desde una posición de altura. Las minas a cielo a cierto abierto son básicamente una gran excavación, por lo cual solo pueden ser percibidas desde "arriba". Otra cosa son las instalaciones de procesado de minerales, en particular las fundiciones, que desde lejos mostrarán la existencia de grandes chimeneas.



Izquierda, la mina de diamantes de Mirny (Siberia, Rusia); a la derecha, la gran chimenea de la fundición de cobre de Kennecott (Utah, USA) (imágenes[11,12]).

Esto es el panorama básico en cuanto a impactos directos. En lo que se refiere a los indirectos, entran aquí en juego otros factores relacionados con la actividad minera como el impacto socioeconómico de la misma. Si no se han realizado estudios serios de sostenibilidad es muy probable que la actividad minera tenga aspectos adversos que pueden consistir en:

- La creación de desigualdades entre aquellos habitantes de los pueblos locales que tienen un buen empleo en la mina y aquellos que no, con todo lo que significa en términos de la convivencia en pequeñas o medianas comunidades.
- La destrucción del medio de vida de las comunidades locales, como zonas de pesca por contaminación de las aguas, terrenos agrícolas por la contaminación de suelos, expropiaciones forzadas, etc.
- La sostenibilidad económica de las poblaciones locales una vez ha cesado la actividad minera. Esta situación puede ser traumática en poblados pequeños, llegándose al abandono de los mismos.



Poblado minero abandonado de Kolmannskuppe en el sur de Namibia después de que cesara la producción de diamantes en 1956 (imagen[13]).

1.3.2 Según el impacto sea a corto o a largo plazo

El que un impacto sea a largo o corto plazo depende en gran medida de las causas de este. Por ejemplo, es difícil que una cuenca hidrográfica fuertemente contaminada por metales pesados pueda ser recuperada en el corto plazo. Y la recuperación de una zona puede ser muy costosa, por ejemplo, los costes de remediación y restauración del complejo Faro-Vangorda (plomo-zinc) en Yukón (Canadá) rondarán los 450 millones de dólares y el sitio minero requerirá vigilancia durante los próximos 500 años (Faro Mine Closure, 2011; Munson, 2011).



Impactos a largo plazo. A la izquierda la mina Faro (Canadá), problemas: drenaje ácido, plomo y zinc (Faro Mine Closure, 2011; Munson, 2011); a la derecha la Cuenca del Río Elqui (Chile), problema: arsénico en sedimentos y aguas (Oyarzun et al., 2004, 2006).

Por otra parte, escombreras de rocas inertes o arcillas no representan un problema de larga duración, ya que basta con alisar y revegetar los materiales para que el impacto (principalmente visual) desaparezca.

1.3.3 Según el impacto sea reversible o irreversible (a la escala humana)

Esta es una materia más compleja que guarda relación con el punto anterior. Retomemos el caso de la mina Faro ¿son 500 años de monitoreo algo que podamos considerar a la escala humana? Alguien dirá que sí, ya que es probable que la humanidad (organizada como sociedad moderna) todavía siga aquí, pero estamos hablando de mucho tiempo y de un legado nefasto para las futuras generaciones. Desde luego, para quienes habitamos el planeta "en este preciso momento", 500 años son un espacio de tiempo que se nos sale de escala. Esto nos lleva a pensar que aquellos impactos a largo plazo sean de alguna manera u otra irreversibles, al menos a nuestra limitada escala de tiempo.

Quizás si "reversible" debiera ser un concepto aplicable solo a los impactos cuya remediación puede desarrollarse a lo largo de una o dos generaciones como mucho.

Cost of Faro's toxic tomb to top $450 million

It will take 45 years to seal Faro's toxic tailings off from the rest of the world, making it one of the most expensive mine remediation projects in Canadian history. Closing Faro's tomb will cost over $450 million and require constant maintenance for at least 500 years. These are the early figures from the Faro Mine Closure plan, now being prepared for an environmental assessment in the fall. Many details still have to be finalized, but this is the first time the daunting, multi-centennial task has been outlined in one coherent plan.

It won't be easy burying the former lead zinc mine. The 25-square kilometer mess consists of 55 million tons of tailings, 320 million tons of waste rock and contaminated spill sites. "Right now, we haven't got the details of the design and specifications for all of the future, but what we do have is a single direction that we can take," said Stephen Mead, the project's senior manager.

The $3.5-billion Federal Contaminated Site Action Plan fund will be paying for the cleanup, and the project will only secure the funding once a finished plan is written over the next several years. The project still has to get a water licence and undergo an environmental and socio-economic assessment. At the moment, the governments spends $7.2 million a year just to maintain the site.

The tailings impoundment must be constantly monitored for breaches. Currently, toxic dust from the tailings makes its way across the Rose Creek Valley whenever winds exceed 20 kilometers an hour.

The really expensive part will begin in 2013, when the Faro mine starts its very long closure. The structures that will shut Faro off from the world will take 15 years to build and cost $30 million annually ...

Munson (2011)

1.3.4. Según el impacto sea local o externo

Esto hace referencia a la distancia que abarca la perturbación inducida por un fenómeno de contaminación. Por ejemplo, las escombreras de mineral ocupan un lugar específico en las inmediaciones de la explotación minera, por lo cual solo generan un impacto local. Esto no se hace así para evitar problemas mayores, sino porque sería carísimo llevar los residuos de

mina lejos de las instalaciones. Por las razones que sean, la presencia de estas escombreras (*botaderos*) puede ser calificada como "impacto local". Otra cosa es si la mineralización sulfurada sub-económica presente en estas escombreras comienza a ser oxidada y lixiviada generando drenaje ácido. Si la mina está cerca de un cauce fluvial entonces el drenaje ácido entrará en el río (o las aguas subterráneas) con todas las consecuencias de dispersión que esto conlleva. Lo mismo se aplica a los gases expulsados por las chimeneas de una fundición, los que serán movidos por los vientos hacia distantes lugares. En estos casos hablamos de "impactos externos".



Impactos externos. Izquierda, drenaje ácido que ha invadido un arroyo; a la derecha, la refinería de cobre de Mt. Isa (Australia) (imágenes[14,15]).

1.3.5 Según el impacto sea evitable o inevitable

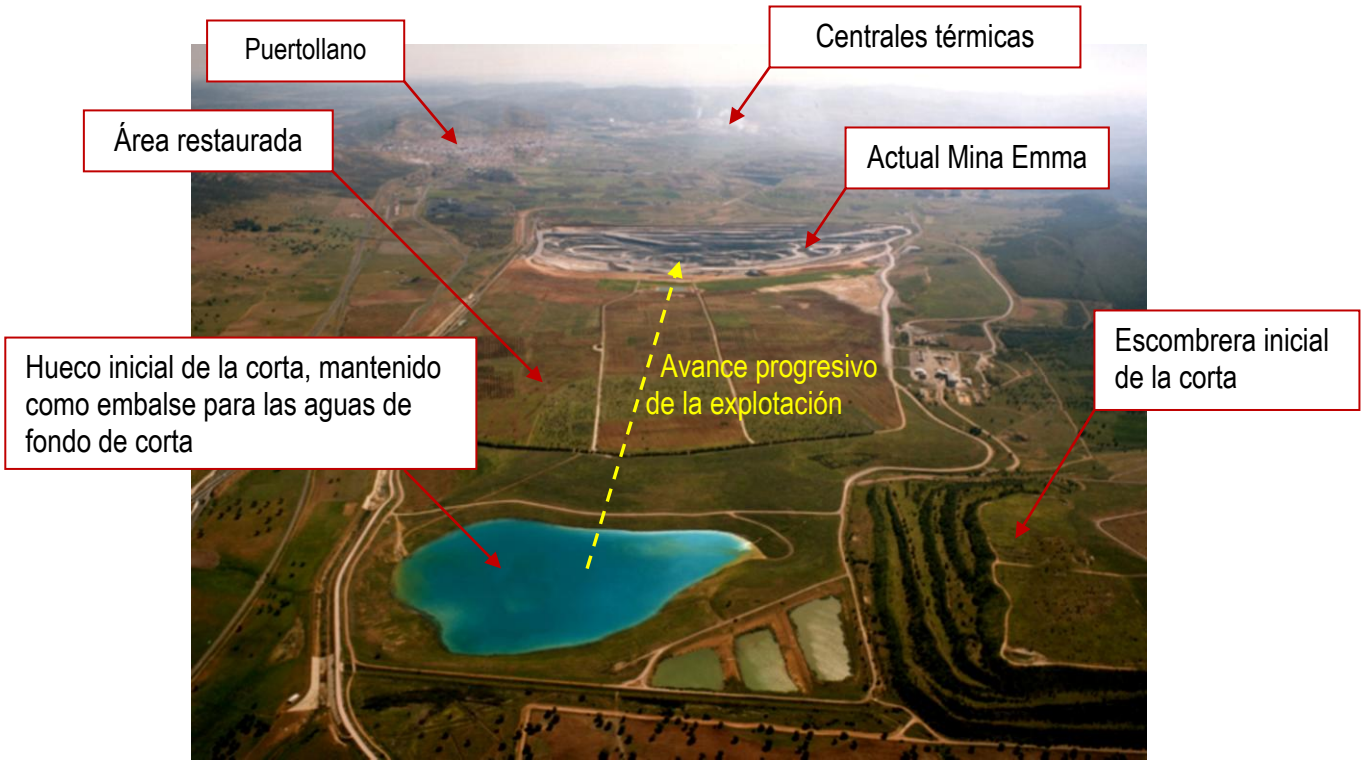
El número de impactos evitables o al menos mitigables crece de manera importante en la minería moderna. Por ejemplo, hoy en día es posible evitar en parte la expulsión de gases de dióxido de azufre o particulado aéreo arsenical desde las fundiciones de sulfuros de cobre mediante procedimientos que abaten el contaminante antes de salir a la atmósfera. Hablaríamos en este caso de "impactos evitables". Sin embargo hay impactos para los cuales no existe solución, por ejemplo, la inmensa acumulación de residuos, que se deriva de las bajas leyes de mineral que se explotan. Por otra parte, la actividad minera implica horadar la tierra, con lo cual el generar una corta (*rajo*) es un impacto inevitable. Alguien podría decir que entonces por qué no se explota el recurso mediante minería subterránea. Ese es tan solo un último recurso, ya que en muchos casos los costes de explotación harían ruinosa la operación.

1.4 Modificaciones del entorno, una primera visión sobre el tema

Otro enfoque a considerar es dinámico y se relaciona con el hecho de que las actividades mineras modifican o pueden modificar al medio en diferentes aspectos; analizaremos esta temática a continuación en las siguientes secciones.

1.4.1 Acciones que modifican el uso del suelo

La minería a cielo abierto inevitablemente modifica los usos del suelo al implicar la realización de excavaciones de tamaño considerable. Incluso cuando esta actividad se realiza mediante minería de transferencia, restaurando a la vez que se avanza en otro extremo de la excavación minera, a menudo los suelos restaurados no mantienen el uso original, puesto que el suelo reconstituido no suele mantener las características del suelo excavado. También deben ser estudiadas las implicaciones socioeconómicas de la actividad, la cual debería revertir en una mejora tanto desde el punto de vista de regeneración del paisaje como del aprovechamiento agrícola y/o ganadero del área afectada. En cada caso primará una o otra cuestión en función de las características concretas de cada zona y del uso previo de la misma.



Minería de transferencia, un sistema ideal de restauración ambiental durante el proceso minero: en este caso, minería del carbón en España, Mina Emma (Puertollano) (imagen[16]).

Otra acción que modifica profundamente el uso del suelo en el entorno minero es la disposición de balsas (*relaves*) y escombreras (*botaderos*), en dos aspectos. Uno es el de la presencia en sí del elemento en cuestión, que inevitablemente modifica el uso del terreno. El otro es que el eventual desmantelamiento de la balsa o escombrera requeriría una regeneración del suelo en sus aspectos físicos (descompactado, aireado) y a menudo también químicos (eliminación de eventuales contaminantes infiltrados durante la presencia de la escombrera sobre el suelo), cuyo coste sería excesivamente alto.

Minería de transferencia

Tradicionalmente la minería del carbón ha sido subterránea hasta la década de los sesentas donde comenzaron a adoptarse la explotación a cielo abierto por el método de cortas, similares a la minería metálica.
La profundidad de estas explotaciones suele ser grande, llegándose en algunos casos a superar los 300 metros.

En la mayoría de los casos suele ser viable la transferencia de los estériles a los huecos creados, pues los yacimientos son, generalmente, alargados y, una vez alcanzada la fase de hueco inicial en un extremo del depósito, es factible efectuar el autorrelleno.

Las escombreras exteriores de estériles que se crean sólo proceden de los materiales del hueco inicial, por lo que en estas explotaciones las posibilidades de recuperación son más amplias que en la minería metálica, al ser las modificaciones fisiográficas menos importantes que si fuera preciso abandonar grandes huecos y depósitos de estériles.

El autorrelleno de los huecos no sólo es conveniente desde la óptica medio ambiental, sino que operativamente es ventajoso al reducirse las distancias de transporte. El método de explotación puede requerir el uso de explosivos en unos casos ó el empleo de grandes rotopalas en otros.

Junta de Andalucía (2011)

1.4.2 Acciones que implican la emisión de contaminantes (sólidos, líquidos, gases y otros: ruidos, onda de choque)

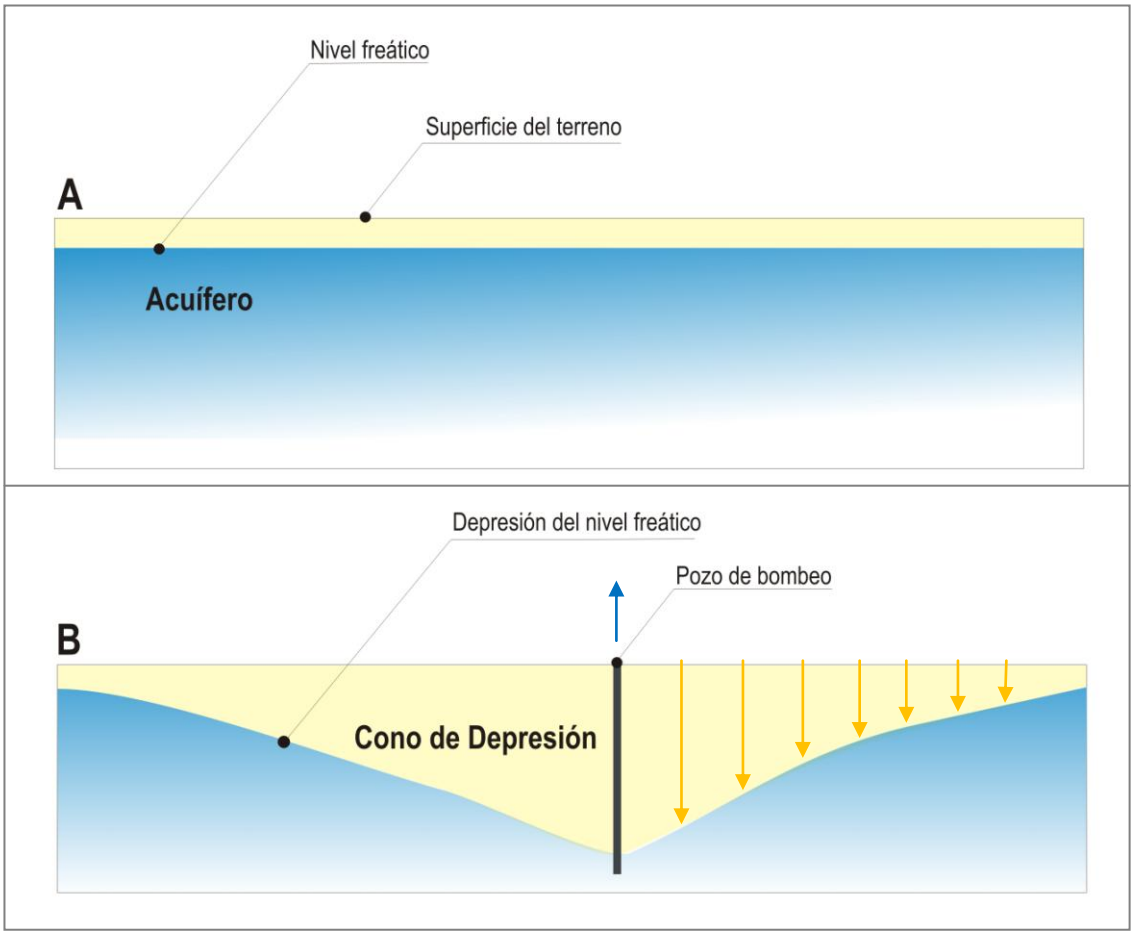
La emisión de contaminantes es siempre un problema importante para la minería: 1) Las voladuras producen la emisión de partículas de polvo, así como también de gases producto de la deflagración del explosivo, a menudo indeseables para la atmósfera, y generan también ruido y una onda de choque. 2) La carga, el transporte y la descarga del material extraído favorecen la dispersión del polvo mineral, y por lo general añaden a la atmósfera gases de combustión de la maquinaria implicada y ruido.

Las actividades mineralúrgicas y metalúrgicas asociadas a la explotación minera tienen también un alto potencial para la generación de efluentes líquidos (en particular los procesos de lavado de la mena), de gases (en particular los de pirometalurgia), y de ruidos. Por su parte la presencia de balsas y escombreras favorece la dispersión de sus partículas finas y la liberación de efluentes líquidos, producto del contacto, infiltración y reacción de las aguas de lluvia con los materiales mineros que la constituyen. Del mismo modo, la necesidad de desaguar las minas, ya sean subterráneas o a cielo abierto, puede generar unos vertidos a los cauces naturales de aguas que como mínimo tendrán unas características físico-químicas diferentes a las del agua circulante, incluso eventualmente tendrán una cierta carga metálica. Por su parte las

instalaciones mineras auxiliares (talleres, oficinas), tienen también un cierto potencial de generación de impactos, en especial los talleres de la maquinaria minera, que a menudo implican la presencia de grandes volúmenes de hidrocarburos líquidos (combustibles, lubricantes), susceptibles de escapes accidentales.

1.4.3 Acciones que implican sobreexplotación de recursos

La minería, tanto subterránea como a cielo abierto, a menudo genera un problema con el aprovechamiento del agua de su entorno. Las excavaciones han de realizarse sobre roca seca, lo que implica la necesidad de deprimir los acuíferos locales, secando pozos productivos hasta ese momento. En ciertos casos el agua extraída puede aprovecharse en superficie, sin que se pueda hablar de sobreexplotación del recurso, pero en otros el agua se utiliza en diversos procesos mineros (planta de flotación, hidrometalurgia), y por tanto sus posibilidades de aprovechamiento en el entorno se reducen drásticamente.



Situación de un acuífero antes de comenzar un bombeo sistemático industrial (A) y situación durante el bombeo, caracterizada por la aparición del cono de depresión del nivel freático (B).

Otros casos históricos de sobreexplotación de recursos se refieren al empleo de la leña en la metalurgia, y un ejemplo bien conocido es el de Almadén. Durante los Siglos XVI al XIX la metalurgia del cinabrio para la obtención del mercurio se basaba en el empleo de leña, y en concreto de la leña de las encinas del entorno de la localidad. El problema de desforestación llegó a ser tan importante que se establecieron áreas metalúrgicas alejadas de Almadén para tener leña disponible, generándose de nuevo el problema en poco tiempo y siendo necesario buscar otros emplazamientos.

1.4.4 Acciones que implican la modificación del paisaje

Como mencionábamos al comienzo de esta obra, el paisaje original de nuestro planeta está profundamente modificado por la acción del hombre, siendo las principales acciones humanas impactantes la agricultura, la construcción de ciudades y la de infraestructuras, cuyos efectos son además prácticamente irreversibles a escala del tiempo humano. El efecto de la minería en este aspecto debería ser limitado en el tiempo, y así se especifica en la reglamentación legal moderna, que exige una restauración del terreno afectados por estas actividades, y por tanto, del paisaje. Así, en lo que se refiere a la modificación del paisaje por la minería tenemos que hablar de las consecuencias de la falta de restauración de la mayor parte de las minas cerradas con anterioridad a los años 1990's, y del impacto que se produce durante la explotación de las actuales minas.



Paisaje profundamente modificado por la minería. Bleanaven, Gales del Sur (imagen[17]).

En lo que se refiere a la minería antigua, su impacto sobre el paisaje se refleja en la presencia de labores abandonadas, sus edificios, ya sean castilletes mineros u otras edificaciones, y de las balsas y escombreras. Son elementos vistosos en el paisaje, destacando por generar "anomalías visuales" significativas. También hay

que recordar que en ocasiones la minería antigua abandonada genera paisajes singulares, que llegan a ser considerados como áreas protegidas por la legislación. Este es el caso de la zona de Las Médulas (León), donde se desarrolló una intensa actividad minera romana que 2000 años después representa un hito singular. Otro ejemplo de menor entidad corresponde al denominado "Terri" de Puertollano, que corresponde a una escombrera de productos residuales de combustión de carbón y se considera como un hito histórico y paisajístico de la ciudad, habiendo sido recuperado recientemente en el ámbito del parque temático minero de la misma.



Patrimonio arqueológico industrial. Izquierda, Las Médulas (León, España), área de minería romana para oro declarada Patrimonio de la Humanidad; derecha, El Terri (flecha), escombrera de residuos de combustión de carbón integrada en el Parque Minero de Puertollano (Ciudad Real, España) (imágenes[18,19]).

También hay que reconocer el valor paisajístico de la presencia de los antiguos castilletes mineros, que se recogen en lo que ha dado en llamarse "patrimonio arqueológico industrial". No obstante, la mayor parte de los elementos mineros abandonados constituyen ruinas de escaso interés, o cicatrices en el terreno de dudosa belleza. La recuperación paisajística de estas áreas es problemática sobre todo por su alto coste, lo que hace más necesario considerar la necesidad imperiosa de que sea algo que no se produzca con la minería moderna.

La minería activa en nuestros días está mucho más regulada desde el punto de vista legal. La legislación minera establece la necesidad de una adecuada recuperación del terreno y el paisaje afectado por esta actividad, con medidas económicas que garantizan el cumplimiento de los compromisos establecidos por la empresa minera. No hay que olvidar que esto se refiere a los países desarrollados, mientras que en algunos países en desarrollo estos compromisos son mucho más laxos o inexistentes, lo que favorece que las zonas afectadas queden sin recuperar.

Resumiendo, todas las actividades mineras modifican el entorno en mayor o menor grado. La mina es como ya hemos comentado un conjunto de elementos mayores (la excavación o pozos, plantas de tratamiento, balsas y escombreras) y elementos menores (edificios de oficinas, de talleres, etc.) que en conjunto constituyen un

asentamiento humano de tamaño variable en función de las características del yacimiento (tamaño del mismo, tipo de explotación), que se localiza en un punto determinado y no "elegible". Solamente podrá instalarse allí donde esté el objeto de nuestra explotación, ya sea un granito de características físico-mecánicas y de vistosidad adecuada, una capa de carbón, o una chimenea kimberlítica conteniendo diamantes.

En función de estas características el impacto sobre el paisaje será muy variado. En ciertos casos este impacto podrá minimizarse mediante un diseño adecuado de la explotación, de forma que se oculten los elementos causantes de los mayores impactos, o mediante el empleo de "barreras visuales" tales como bosques o arboledas, que aunque también suponen una modificación del paisaje, se pueden considerar como "compatibles" con el medio, al menos en ciertos casos.

1.4.5 Acciones que repercuten en las infraestructuras

El "valor localizado" de la minería a menudo genera interferencias con la presencia de infraestructuras, ya sean ciudades, pueblos u otras obras públicas. Cuando el problema afecta a una infraestructura de alto valor añadido, como una gran ciudad, o una zona declarada patrimonio de algún tipo, la lógica aconseja no desarrollar el proyecto minero correspondiente, salvo que se diseñe una explotación que respete y garantice el respeto de estos elementos preexistentes.

Este no es un problema exclusivo de la minería, recordemos los problemas que genera la construcción de túneles bajo las ciudades, y que puede afectar a su patrimonio actual (caso de Barcelona y los túneles ferroviarios bajo la iglesia de la Sagrada Familia) o pretérito (ruinas históricas en el subsuelo de ciudades como Córdoba, Mérida, Roma, etc.). En cualquier caso, el desarrollo de tal proyecto minero implicaría riesgos y costes muy difíciles de asumir.

*Unos 50 vecinos de **El Llano del Beal** se desplazarán a Bruselas, donde permanecerán hasta el 30 de junio de 1988 para exponer ante los diversos organismos de la Comunidad Europea la problemática situación por la que atraviesan. Los vecinos presentarán una queja en el Parlamento Europeo sobre el proyecto de cantera que tiene previsto llevar a cabo Peñarroya en las inmediaciones de El Llano, así como los vertidos que esta empresa deposita en la Bahía de Portmán.*

Lo que los representantes de los vecinos pretenden es que se estudie si el proyecto, tal como está concebido, es compatible con la política de Medio Ambiente de la Comunidad Europea. Del mismo modo solicitarán una vez mas que no haya más vertidos de Peñarroya en la Bahía de Portmán, a la que también se planteará su regeneración.

En: García Belchí (2007)



Minas y ciudades (o el huevo y la gallina). Izquierda, la mina de diamantes Mirny en Siberia (flecha) (imagen[20]); derecha, balsa de residuos de flotación en el pueblo de Andacollo (Chile). Que fue primero ¿la ciudad o la mina? La minería atrae mineros que acaban estableciéndose en el lugar. Pasados unos años, décadas, la gente protesta por la existencia de la mina o sus residuos, un poco lo que pasa con los aeropuertos.



Afectación de patrimonio histórico por obras no mineras. Izquierda: Medidas de refuerzo para evitar que el túnel ferroviario de Barcelona afecte a la Catedral en construcción de la Sagrada Familia; derecha, ruinas encontradas durante la excavación del Metro en Atenas (imágenes[21,22]).

En otros casos, la necesidad de excavar áreas en las que existen infraestructuras de menor entidad o coste (económico y social) implica la necesidad de modificar éstas en mayor o menor grado. Por ejemplo, el desarrollo de la mina de Chuquicamata implicó la necesidad de que la localidad de este nombre desapareciera, con traslado de la población implicada a la localidad próxima de Calama. Otros casos implican la necesidad de modificar el trazado de carreteras o ferrocarriles, para lo que se hace necesario un acuerdo con las autoridades correspondientes, que definirán la viabilidad de estos cambios, y a quién corresponde asumir los costes correspondientes, que a veces pueden llegar a ser asumidos por la propia administración, si el proyecto supone unos beneficios sociales de suficiente entidad.

> *En 1992, Chuquicamata fue declarada zona saturada de material particulado respirable y anhídrido sulfúrico. El año siguiente, se detectó que existían altos niveles de arsénico. Estos problemas ambientales, sumado a dificultades con la expansión de la mina motivaron que Codelco tomara la decisión, entre 1992 y 1997, de trasladar a la población de Chuquicamata, construyéndole casas en Calama. Esto, en su gran mayoría, no ocurriría hasta 2004.*
>
> *Zazzali (2010)*

En la parte positiva, la necesidad de buenas comunicaciones desde la zona minera hacia otras (puertos, fundiciones, mercados del producto minero) puede incidir sobre la mejora de éstas, al tener que sustentar mayor tráfico en general, y de mercancías pesadas en particular en muchos casos. Recordemos que un buen número de líneas de ferrocarril se tendieron en los Siglos XIX y XX para atender las necesidades de la minería. Este fue el caso del primer ferrocarril de Chile, inaugurado en 1851 y que unió la ciudad de Copiapó con el puerto de Caldera para mover los minerales de plata de Chañarcillo.

El primer ferrocarril de Chile

En julio de 1851, se inauguró el primer tramo de la vía férrea de 41 kilómetros de longitud, entre la ciudad de Caldera hasta Monte Amargo. La Copiapó fue la primera locomotora en recorrer las vías nacionales. Este fue un gran momento para William Wheelwright, el infatigable ingeniero norteamericano, precursor de la Compañía del Camino Ferro-Carril de Copiapó, empresa constructora de la primera vía férrea nacional y la tercera de Sudamérica. Sin embargo, es necesario constatar que la idea original de la construcción de un ferrocarril chileno, fue de un relojero de Valparaíso, Juan Mouat, quien incluso realizó algunos estudios destinados a materializar su sueño.

El descubrimiento del mineral de plata de Chañarcillo en 1832, concentró en la zona un gran movimiento de materiales, víveres y pasajeros. El objetivo del primer ferrocarril en Chile fue atender las necesidades de una región principalmente minera. Para materializar el proyecto, Wheelwright, quien era accionista de la Compañía Anglo-Chilena de Minas en Copiapó, contó con el apoyo de grandes capitalistas chilenos de la época, como Agustín Edwards Ossandon, Diego Carballo y Candelaria Goyenechea de Gallo.

Memoria Chilena (2004)

1.4.6 Acciones que modifican el entorno social, económico y cultural

El denominado "impacto socioeconómico" de las actividades mineras solía ser uno de los factores más positivos para la implantación de una explotación minera. Esta afirmación era prácticamente cierta en otros tiempos, en los que la actividad minera traía "la industria" a lugares en las que no existía. En la actualidad sigue siendo así en algunos países, en áreas económicamente poco desarrolladas en general. La minería ofrece puestos de trabajo directos e indirectos, construcción o mejora de infraestructuras de transporte, aumento de población, etc. Pero el impacto socioeconómico no puede considerarse solamente desde el punto de vista de la mejora de las condiciones de vida de una parte de la población, pues también hay una parte afectada negativamente por la presencia de la actividad minera. Es por ejemplo el caso de las poblaciones indígenas de áreas remotas, alejadas de la civilización, y que se ven afectadas por el descubrimiento y puesta en explotación de recursos mineros en su territorio, y que se ven obligados a cambiar sus condiciones de vida ancestrales.

Podemos argumentar que la minería fue la principal razón de la modernización de Hispania en tiempos de los romanos, o de Iberoamérica en el período colonial, pero estos planteamientos no resultan del todo aceptables para la sociedad actual.



Protestas de las comunidades indígenas en Perú contra la minería (imágenes[23,24]).

1.4.7 Impactos ambientales previos a la explotación minera

Con anterioridad a la explotación minera de un yacimiento éste ha de ser "encontrado" y evaluado. Para ello se emplean una serie de técnicas que en sus primeras etapas (cartografía geológica, prospección geoquímica y geofísica) tienen un escaso impacto sobre el medio, puesto que suelen hacerse sin apenas uso de maquinaria pesada, y sin modificar el entorno ni favorecer la contaminación del mismo.

No obstante, la fase final de la exploración, así como la evaluación del yacimiento, precisan de la realización de sondeos mecánicos (*sondajes*). Para esto a menudo es necesario abrir caminos nuevos (que en algunos casos suponen una mejora de las infraestructuras de la zona afectada), hace falta un caudal determinado de agua, y hay que instalar unas máquinas que en general producen ruidos y emisiones de gases de combustión de sus motores a la atmósfera.

También el agua de retorno de la perforación puede suponer un riesgo de contaminación de aguas superficiales, si escapa de los sistemas de contención establecidos para evitar su escape. También puede afectar a las aguas subterráneas, si las aguas del proceso de

Stage 1 – Mineral Exploration

Mineral exploration is the search for valuable mineral resources in the earth's crust, and can require several years of exploration and research. Stage 1 activity does not dictate that a mine will be developed. In fact, very few grass roots projects eventually become a mine. During exploration, geologists review maps and reports, and use satellite imagery, sensors and computers to survey large areas of land. If the results are encouraging, trenching, exploratory drilling (obtaining rock samples from within bedrock), sampling and mineral assays are undertaken. If warranted, larger, more intensive drill programs are conducted…

Stage 2 – Deposit Evaluation

… Deposit evaluations usually involve on-site geologists and drill rig operators. Typically a camp is set up with support staff and a community relations team. This stage presents opportunities for the exploration team to engage host communities in participatory processes related to project design by:

Providing information on the mining cycle.

Sharing possible mine development scenarios and timing.

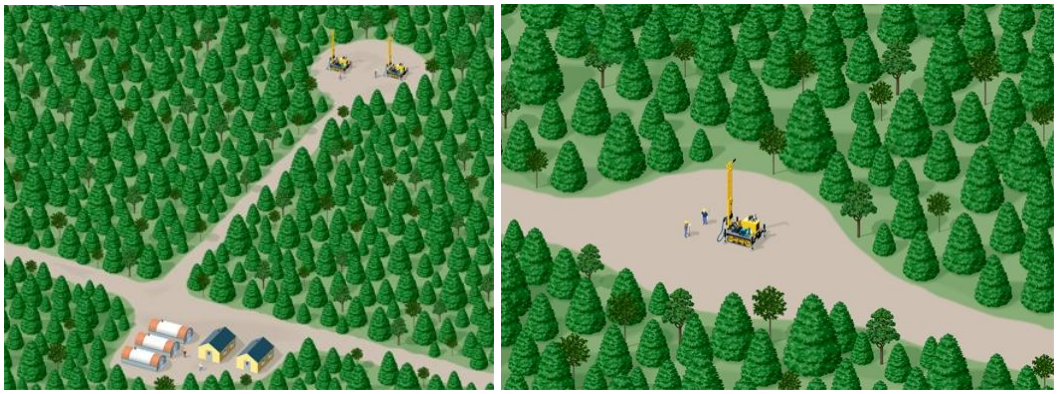
Sharing information on social, environmental and development socio-economic needs and priorities.

Understanding local concerns.

Teck (2009)

perforación se infiltran en acuíferos limpios atravesados por el sondeo.

En cualquier caso, los riesgos de impacto ambiental propios de esta fase son poco importantes en relación con los de la explotación minera en sí. Si la exploración y evaluación finalizan sin éxito, habrá que considerar la necesidad de reparar los impactos ocasionados, lo que a menudo queda olvidado.



Sondeos de exploración minera en una región boscosa, incluyendo la apertura de pistas y claros para vehículos e instalaciones.Teck (2009).

1.4.8 Impactos ambientales durante la explotación minera

La fase de explotación de un yacimiento genera un gran impacto, se instalan edificios necesarios para el funcionamiento de la mina, se produce la excavación de la corta o perforación de los pozos, se disponen las escombreras y balsas, y en definitiva, se modifica el área profundamente. En paralelo se va generando en mayor o menor medida una aureola de contaminación alrededor de la explotación. Será también la etapa durante la cual podrán producirse escapes accidentales de efluentes más o menos tóxicos, y otros eventos accidentales que generen impactos aún mayores de lo previsto por la planificación minera.



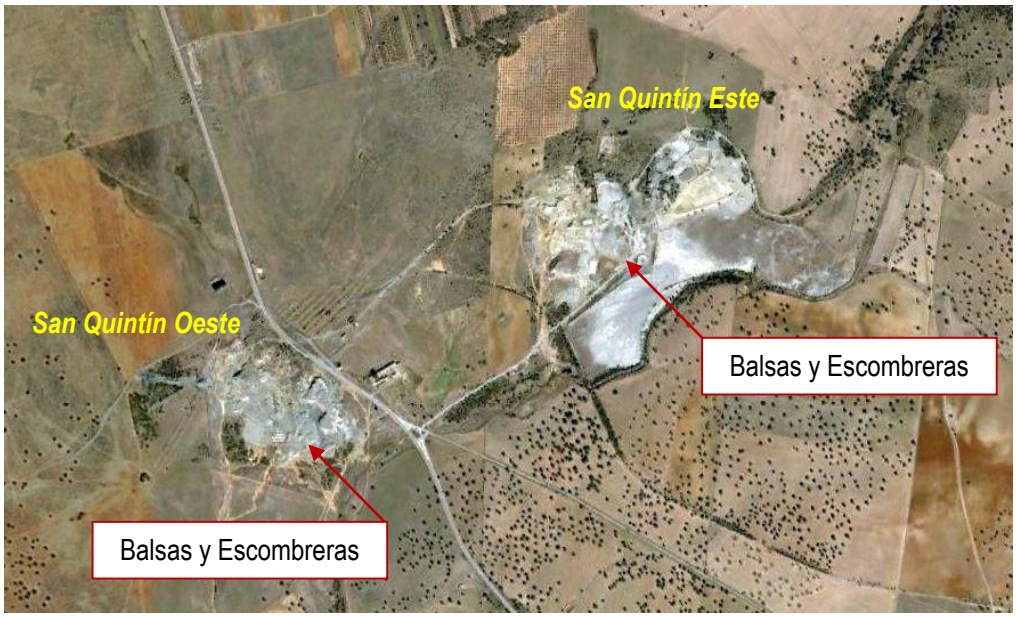
Una de las imágenes más conocidas a nivel mundial de un accidente minero, la rotura del dique de contención de la balsa de estériles de Aznalcóllar (Sevilla, España); a la derecha, sección esquemática mostrando la evolución del proceso de rotura (imágenes[25,26]).

Este hecho obliga a considerar esta fase como la que en mayor medida necesita de un estudio de impacto ambiental y un compromiso ante la administración de

llevar a cabo un proyecto sostenible en su conjunto, que asuma las responsabilidades que puedan derivarse de accidentes o eventos no previstos. La planificación detallada de medidas de seguridad, y los controles de ejecución de éstas son las herramientas vitales para minimizar los riesgos conocidos o imprevistos que puedan resultar del desarrollo de esta actividad.

1.4.9 Impactos ambientales posteriores a la explotación minera

El cese de la actividad minera suponía hasta los años 1980's el mayor riesgo de impacto ambiental de la minería. Las áreas explotadas se abandonaban totalmente o quedaban sujetas a un escaso mantenimiento en espera de mejores precios para el producto minero correspondiente. Así, a partir de un determinado momento las labores se abandonaban definitivamente.



Minería abandonada. Imagen Google Earth del Grupo Minero San Quintín (Ciudad Real, España), activa desde los años 1920's hasta los 1980's por la Sociedad Minero-Metalúrgica Peñarroya España, y abandonada desde entonces. La mina se divide en dos sectores, este y oeste, y se encuentra situada en una zona relativamente llana, y atravesada por una carretera, lo que aumenta su impacto visual. El arroyo de San Quintín drena toda la zona minera y fluye hacia el río Tirteafuera. La imagen cubre unos 3 km en E-W. Norte hacia arriba.

Sobre esta base deberemos admitir que el mayor riesgo de impacto ambiental de una explotación minera es que su cierre no se produzca de forma programada. Esto es, sin que lleguen a cumplirse los compromisos de restauración asumidos por la empresa al presentar el correspondiente plan o proyecto de explotación ante las autoridades mineras y ambientales correspondientes.

Los riesgos ambientales implicados en cierres inadecuados de una explotación incluyen:

- Las afectaciones permanentes al paisaje por las excavaciones, edificaciones, balsas y escombreras.
- Las afectaciones a la atmósfera por las partículas de polvo que quedan a disposición del viento para su dispersión y de ahí al entorno.
- Las afectaciones a las aguas superficiales por la posibilidad de contacto con el mineral de las excavaciones, balsas y escombreras y la posibilidad de oxidación, hidrólisis y/o disolución de compuestos muy diversos, a menudo generando además acidez extrema.
- La alta probabilidad de que el entorno minero se transforme en un lugar totalmente degradado, en el que se considere aceptable verter otros residuos y desechos, y aprovechar los existentes de forma incontrolada.

Una completa documentación sobre este tipo de problemas se puede encontrar en los documentos *on-line* de la página web del GEMM: Grupo Minero San Quintín (Ciudad Real) (López García, et al., 2010).

Bibliografía

Atención: *Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.*

Bates, D., 2009. The Importance of d-block transition metals. http://www.chem.uwec.edu/Chem115_F02/batesdj/paper.html

Faro Mine Closure, 2011. Faro Mine: History. http://www.faromine.ca/mine/history.html

García Belchí, M., 2007. Investigación acerca del tratamiento de la información sobre la regeneración ambiental de la bahía de Portmán (La Unión-Murcia). Documentación de las Ciencias de la Información, 30, 349-361. http://www.ucm.es/BUCM/revistas/inf/02104210/articulos/DCIN0707110349A.PDF

Junta de Andalucía, 2011. Tipología de las explotaciones y principales afecciones ambientales asociadas. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estado_Y_Calidad_De_Los_Recursos_Naturales/Suelo/documentos/tipos_explotaciones.pdf

López García, J.A., Oyarzun, R., López Andrés, S., Fernández Barrenechea, J., Cubas, P. y Crespo, A., 2010. Grupo Minero San Quintín (Ciudad Real): Sitio docente de entrenamiento activo para evaluaciones ambientales. http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintin_Innova/index.html

Memoria Chilena, 2004. Ferrocarril Caldera-Copiapó. http://www.memoriachilena.cl/temas/index.asp?id_ut=elprimerferrocarrildechile:elferrocarrildecalderaacopiapo%281849-1851%29

Munson, J., 2011. Cost of Faro's toxic tomb to top $450 million. Yukon News, http://www.yukon-news.com/news/11195/

Oyarzún, J., 2008. Planes de Cierre Mineros ― Curso Resumido. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Cursos/Planes_cierre_minas_Oyarzun.pdf

Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Oyarzun, R., Lillo, J., Higueras, P., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio–Tambo district) vs. geologic processes. Journal of Geochemical Exploration, 84, 53-64.

Oyarzun, R., Guevara, S., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. e Higueras, P., 2006. The As-contaminated Elqui river basin: a long lasting perspective (1975–1995) covering the initiation and development of Au–Cu–As mining in the high Andes of northern Chile. Environmental Geochemistry and Health, 28, 431-443.

Rowan, A., 2009. Africa's burning charcoal problem. BBC News, http://news.bbc.co.uk/2/hi/africa/8272603.stm

Teck, 2009. The mining life cycle. 2009 Sustainability Report, Teck, http://www.teck.com/Generic.aspx?PAGE=2009+Sustainability+Report+Site%2fOur+Approach+Pages%2fThe+5+Stages+of+Mining&portalName=tc

The Economist, 2011. Black sand in the desert. The Economist, September 3rd - 9th, p. 46. http://www.economist.com/node/21528288

Zazzali, C., 2010. Buscando Identidad. Tell Magazine, http://200.24.235.2/tell.cl/antofagasta/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=978

Fuentes de las imágenes (a Septiembre-Octubre de 2011)

1. http://www.theaustralian.com.au/business/mining-energy/bhp-billiton-approves-escondida-copper-project/story-e6frg9dx-1226031253078
2. http://geology.isu.edu/Digital_Geology_Idaho/Module7/Bunker-Hill_aerial_photo_smelter_1984.jpg
3. http://www.vanguardia.com.mx/sera_penoles_mas_agresiva-429050.html
4. http://www.onearth.org/article/canadas-highway-to-hell
5. http://www.mnn.com/earth-matters/wilderness-resources/stories/burger-king-drops-palm-oil-company
6. http://www.hobotraveler.com/labels/tribal.html
7. http://alkoholikuin.blogspot.com/2010/05/maquinaria-agricola-alemanaomg.html
8. http://www.guidetobceconomy.org/major_industries/fishing.htm
9. http://www.barricksudamerica.com/galeria/indio.php
10. http://www.flickr.com/photos/buttepubliclibrary/4341288681/in/set-72157622362770697/#/photos/buttepubliclibrary/4341288681/lightbox/
11. http://lumq.com/09/the_biggest_earth_holes/
12. http://www.astm.org/SNEWS/OCTOBER_2004/kirkun_fig1_oct04.html
13. http://www.tipete.com/userpost/imagenes/megapost-de-lugares-abandonados-en-el-mundo-imagenes-gratis
14. http://www.uwplatt.edu/enve/pictures/envchem.html
15. http://www.picturestore.com.au/product.aspx?productID=275935
16. http://www.uclm.es/users/higueras/mam/emma.htm
17. http://www.edwud.com/2009/09/02/welsh-mining-landscape-bleanaven/
18. http://lasiguientelapagoyo.blogspot.com/2011/05/las-medulas.html
19. http://www.puertollano.es/
20. http://kerjarumahku.blogspot.com/2010/05/great-hole.html
21. http://www.elboomeran.com/blog-post/1/3271/felix-de-azua/incorrectisima-propuesta-artistica/
22. http://www.travellerspoint.com/photos/stream/photoID/620438/orderByID/
23. http://www.rootforce.org/2009/06/19/peru-mine-blockade-enters-10th-day/
24. http://www.greenleft.org.au/node/47820
25. http://alimanasyvermes.blogspot.com/2010/02/sobre-la-formacion-de-los-ministros-de.html
26. http://daveslandslideblog.blogspot.com/2010/10/ajkai-timfoldgyar-mine-disaster-lessons.html

2.1 La actividad minera extractiva

2.1.1 Introducción

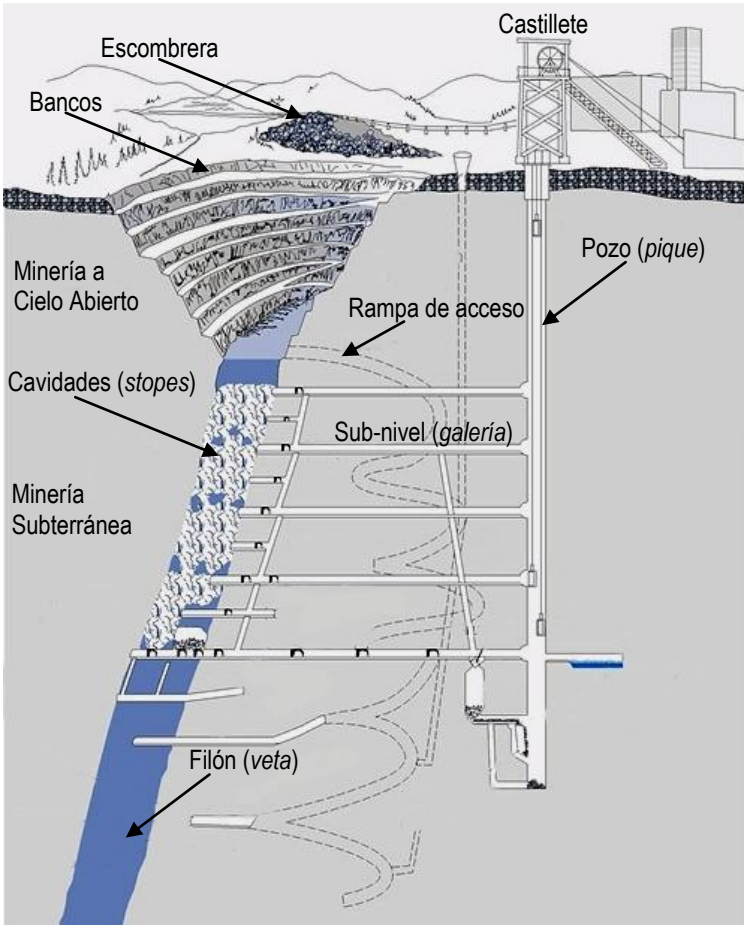
Con la excepción del oro (de dudosa necesidad social), la minería consiste en la extracción de recursos minerales "cruciales" para el desarrollo de la sociedad. Estos recursos pueden encontrarse en superficie y disgregados, entonces la minería solo tiene que proceder (básicamente) a su carga y transporte. Este es el caso por ejemplo de las explotaciones de gravas y arenas de las llanuras de inundación de los ríos o el de las arcillas.



Depósitos de arenas y gravas en la gravera El Puente, Aranjuez (Madrid). A la izquierda, depósitos aluviales no consolidados en la vega del Río Jarama; a la derecha, operación de una dragalina.

En otros casos el mineral de interés se encuentra formando parte integral de rocas que aparecen en la superficie del terreno y se extiende en profundidad, o se encuentra totalmente bajo la superficie del terreno. En estos casos la minería tiene que emplear métodos de explotación más agresivos, basados en la excavación del terreno, bien mediante pozos y galerías (minería subterránea) o bien mediante excavación directa en minería a cielo abierto (canteras y cortas = *rajos*).

El método de explotación se elige en función de las características morfológicas del o de los cuerpos mineralizados y su relación con la superficie. También incide en la elección las características estructurales (p.ej. fracturación) del macizo de roca que alberga la mineralización. Todo esto sin mencionar los decisivos aspectos económicos derivados del uso de una metodología u otra.





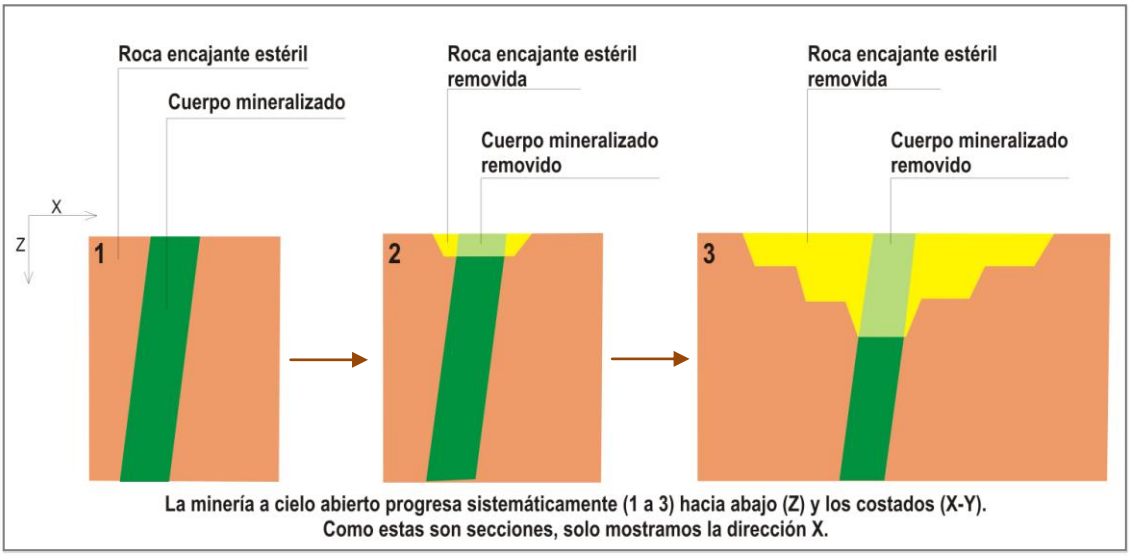
Minería a Cielo Abierto

Minería Subterránea



Figura que recoge el paso progresivo en el tiempo de una minería a cielo abierto a otra de tipo subterráneo. Esto ocurre en raras ocasiones, cuando la relación roca estéril a roca mineralizada sube demasiado como para hacer rentable la operación de superficie. Lo usual es que una masa filoniana se explote subterráneamente desde el inicio (imágenes[1-3]). Imagen de la izquierda ligeramente modificada de Atlas Copco (2007).

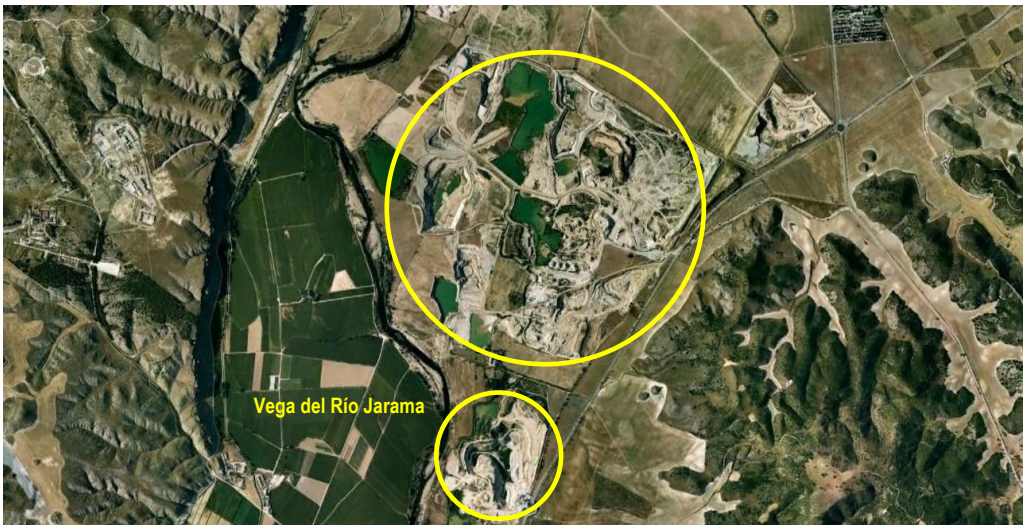
Por definición la minería subterránea es más cara que la de cielo abierto. Si analizamos el ejemplo expuesto en la figura de arriba, veremos cómo se ha pasado de una minería de cielo abierto a otra subterránea. ¿Por qué? El cuerpo mineralizado es un potente filón, que pudo ser inicialmente explotado a cielo abierto. Sin embargo, pasado un tiempo, la relación entre la roca estéril y la mineralizada comienza a aumentar (ver siguiente figura). Esto es así porque para profundizar (dirección Z) en una explotación a cielo abierto también hay que expandirse de manera importante en las direcciones X e Y. De otra manera el ángulo de talud en la explotación sería muy grande y la explotación se haría inestable. Digamos que dependiendo de la leyes y tonelajes, así como del valor del mineral o roca explotada, una relación roca estéril a roca mineralizada (removidas) del orden de 3:1 es aceptable, pero una de 4:1 no lo es.



Como puede apreciarse en la figura, en el caso de cuerpos mineralizados tabulares (como los filones), pasado un tiempo el volumen de roca estéril que tiene que ser removido para profundizar en condiciones de seguridad aumenta progresivamente, llegándose a un punto crítico en el cual la explotación tiene que pasar a ser subterránea por razones económicas (aumento de la razón estéril/mineral). En la mayoría de los yacimientos filonianos la explotación subterránea se desarrolla desde el comienzo. Por cierto, el paso de cielo abierto a subterráneo (si se realiza) no es exclusivo de los yacimientos filonianos y como ejemplo relevante, este procedimiento será aplicado a un sistema mineralizado tipo pórfido cuprífero como el de Chuquicamata (Chile) atendiendo a razones económicas y geotécnicas.

2.1.2 Impactos ambientales asociados tipos específicos de minería

El impacto ambiental en cada tipo de minería es diferente. Por ejemplo, las "graveras" de los valles aluviales requieren la excavación de áreas extensas, y que además suelen corresponder a zonas de alto valor ecológico, como son las zonas de ribera de los ríos.



Graveras en la vega del Río Jarama (círculos). La explotación se realiza en una de las terrazas del río. La imagen cubre unos 7 km de E-W. Norte hacia arriba. Imagen Google Earth.

Por otra parte, si la explotación se lleva acabo a nivel del río habrá que bombear agua en los huecos de explotación, lo que llevará a una depresión del nivel freático. Además los finos liberados durante la operación pueden llegar al río y generar turbidez.



Hueco de explotación en la gravera El Puente (Aranjuez, Madrid) y sistema de bombeo de las aguas de infiltración.

Las "minas subterráneas" suelen implicar el menor impacto visual, pues se trata de uno o varios pozos (*piques*), sobre los que se construyen edificios singulares (los castilletes), que no resultan ser modificaciones significativas del entorno más que durante su funcionamiento por el ruido que implican. No obstante, si esas estructuras no son removidas después del cese de las explotaciones, estos pasarán a formar parte de un conjunto de estructuras alóctonas al paisaje. Sin embargo, en muchos casos tanto los castilletes como los edificios abandonados pueden enriquecer el entorno si en el lugar de la antigua explotación se constituye un "parque minero", que puede pasar a constituir una atracción turística y cultural. Estos parques a su vez pueden insuflar nueva vida a una localidad que ha sufrido la pérdida de una fuente de ingresos y puestos de trabajo.



Castillete (flecha) y edificios mineros abandonados en recuperación; Parque Minero de La Unión, sector de Cabezo Rajao (La Unión, Murcia).

Como comentábamos en el capítulo anterior, no cabe duda que el impacto visual desde la altura es menor en estas minas que en las de cielo abierto, no obstante,

hay impactos que pueden ser infinitamente más importantes que el visual (el más "inocuo" de todos). Nos referimos a la generación de drenaje ácido.

Las explotaciones mineras subterráneas pueden llegar a generar desde decenas a miles de kilómetros de galerías, que multiplican el área de reacción roca-agua-aire. Por ejemplo, la mina El Teniente en Chile, que se empezó a explotar en 1904, posee unos 2400 km de galerías (CODELCO, 2011). Las galerías se pueden convertir en reactores químicos que contaminan el drenaje subterráneo y superficial (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Todo comienza con la oxidación de la pirita, pieza clave en el proceso de oxidación-lixiviación, que genera sulfato férrico que aporta iones Fe^{3+} y ácido sulfúrico, que a su vez aporta iones sulfato SO_4^{-2} y H^+ al sistema (1,2). A su vez, el sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$) es una pieza química clave en los procesos de oxidación que se producen en el resto de los sulfuros (3-6) (Blanchard, 1968; Gupta, 2010).

(1) $4FeS_2 + 14O_2 + 4H_2O \rightarrow 4FeSO_4 + 4H_2SO_4$

(2) $4FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O_2 \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O$

(3) $CuFeS_2 + 2Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow CuSO_4 + 5FeSO_4 + 2S$

$H_2SO_4 \rightarrow H^+ + HSO_4^-$

$Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Fe^{3+} + 3SO_4^{2-}$

$CuSO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-}$

(4) $Cu_3AsS_4 + 20H_2O + 35Fe^{3+} \rightarrow 3Cu^{2+} + AsO_4^{3-} + 4SO_4^{2-} + 40H^+ + 35Fe^{2+}$

(5) $ZnS + 8Fe^{3+} + 4H_2O \rightarrow Zn^{2+} + 8Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 8H^+$

(6) $PbS + 8Fe^{3+} + 4H_2O \rightarrow Pb^{2+} + 8Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 8H^+$



Drenaje ácido de mina en relación a explotaciones subterráneas (imágenes[4,5]).

En un sistema ácido rico en sulfato férrico (esto es, rico en Fe^{3+}), los sulfuros y sulfosales son oxidados y los metales puestos en solución. En las reacciones (3) y (4) observamos como la calcopirita ($CuFeS_2$) libera cobre y la enargita (Cu_3AsS_4) libera cobre y arsénico, mientras que en (5) y (6) observamos la puesta en solución del zinc y el plomo a partir de esfalerita (ZnS) y galena (PbS) respectivamente.



Minería subterránea. A la izquierda, Jumbo perforando con sus dos brazos articulados (visto desde atrás); a la derecha, equipo LHD en operación de carga (imágenes[6,7]).

Un problema adicional que puede presentar la minería subterránea es el colapso del terreno una vez que ha cesado la actividad minera y se ha dejado de reforzar las galerías cercanas a la superficie. Este problema no es anecdótico y puede causar graves daños en núcleos poblacionales.



Subsidencia del terreno debido al colapso de labores mineras subterráneas (imágenes[8,9]).

Por su parte las "minas a cielo abierto" presentan su propia problemática ambiental. Bajo un punto de vista visual el impacto puede ser grande o pequeño. Será importante cuando la explotación es del tipo "cantera", es decir trabajando una montaña desde afuera hacia adentro. Esto es típico de muchas explotaciones de rocas ornamentales y minerales industriales en España, lo que deja huellas muy notables en el paisaje, generándose un impacto visual importante. El problema tiene remedio si durante la operación o con posterioridad al cierre se realiza una adecuada restauración.



Cantera de caolines en el Alto Tajo (Guadalajara, España). Un importante proyecto de mitigación de impactos y restauración se está llevando a cabo en estas explotaciones. El proyecto es liderado por la Universidad Complutense de Madrid y está a cargo del Profesor J.M. Duque, de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM.

Por su parte las cortas (*rajos*) suelen implicar en términos muy simples un gran agujero en el terreno que avanza progresivamente hacia abajo y los costados. Este método es de amplia utilización en los grandes yacimientos metálicos. Dado que la obra minera avanza "hacia abajo", la corta en si es difícilmente observable a la cota del terreno, y es solo perceptible desde un punto a mayor altura o desde el aire. Si la obra minera se realiza en la parte superior de una montaña, la visibilidad de la obra será aún menor aunque aparecerán problemas mucho más grandes. Tal es el caso de las explotaciones a cielo abierto en la Cordillera Central de la Isla de Nueva Guinea.

Como comentábamos anteriormente, una condición *sine qua non* de la minería metálica son las ingentes cantidades de residuos que genera. ¿Qué se hace con estos residuos cuando la explotación se realiza en medio de una cordillera a gran altura y no hay espacio para el acopio de los mismos? En ausencia de una vigilancia ambiental importante, y como el lector podrá imaginar, se dejan caer por gravedad rellenando los valles adyacentes. Si hablamos de roca estéril esto no sería un gravísimo problema (aunque sea grande *per se*), pero si se trata de residuos, en este caso colas (*relaves*) de la planta de flotación, entonces el daño puede ser inconmensurable, ya que esos residuos suelen ser relativamente ricos en pirita, y como hemos explicado con anterioridad, la oxidación de este mineral es clave para la generación de drenaje ácido. Volveremos sobre estos temas más adelante.



La mina de cobre-oro de Grasberg en la Cordillera Central de la Isla de Nueva Guinea; observe el relieve montañoso donde se desarrolla la operación minera (imagen[10]).

A los impactos antes señalados en minería a cielo abierto tenemos que sumar el tema del drenaje ácido de mina, el cual puede también llegar representar un problema grave o muy grave, como señalamos en el capítulo anterior cuando tratamos el caso de mina Faro en Yukón (Canadá).

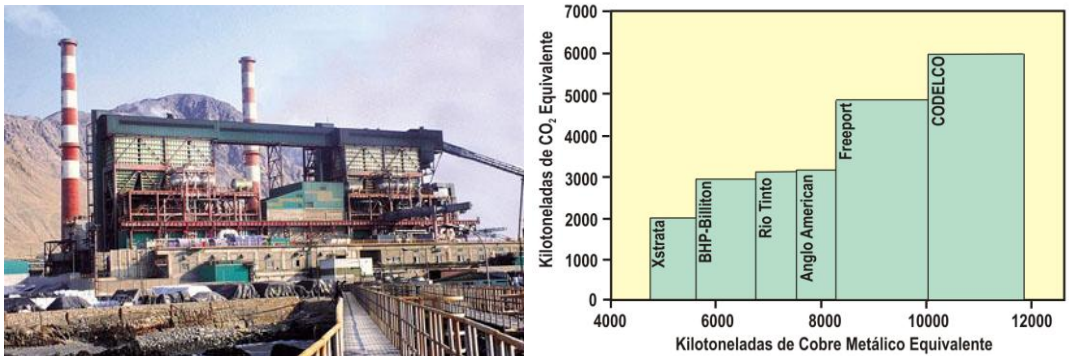


Minería a cielo abierto. Los colores revelan procesos químicos que hablan por sí solos. A la izquierda Mina Faro (Yukón, Canadá); a la derecha el Berkeley Pit (Butte, Montana, USA). Note el color de los lagos artificiales (imágenes[11,12]).

2.2 El procesado de minerales

2.2.1 Introducción al tema

Junto con las labores mineras propiamente dichas se encuentran otras fuentes de impacto al medio: las plantas de tratamiento de mineral y sus residuos, esto es, las escombreras (*botaderos*) y balsas (*relaves*). Debemos además añadir los talleres mecánicos, los depósitos de combustible, oficinas, y otros elementos que pueden presentar complejidades ambientales por sí mismos, como es el caso de las centrales térmicas que proporcionan la energía eléctrica al complejo minero-metalúrgico. Tal es el caso, por ejemplo, de la central eléctrica de Tocopilla (Chile) que proporciona energía eléctrica al complejo minero-metalúrgico de Chuquicamata. Dado que esta central opera con carbón, aumenta de manera considerable la huella de carbono de la operación minera de Chuquicamata, y en su conjunto, la de CODELCO-Chile.



La central termoeléctrica de Tocopilla (imagen[13]) y la huella de carbono de CODELCO en relación a otras empresas mineras que explotan cobre a escala mundial acumulada (datos para 2009). Figura adaptada y simplificada de World Mine Cost Data Exchange (2011). Para más detalles ver Oyarzún y Oyarzun (2011).

Pero los problemas más serios de contaminación asociados a la minería de minerales metálicos provienen del peligro que representan los residuos dejados por el procesado de minerales. Antes de llegar a este punto que trataremos en la siguiente sección de este capítulo, definiremos algunos conceptos básicos.

La extracción de cualquier mineral mediante la minería supone la necesidad de extraer no solo aquello que directamente nos interesa sino también de extraer el denominado “estéril”, aquella parte de la roca en la que encaja la mineralización y que no tiene interés económico en el momento en que se realiza la acción. Incluso el “mineral” que extraemos a menudo está íntimamente unido a otros que no interesan.

A efectos de este libro llamaremos "estériles" a aquellos materiales sin mineralización o con leyes muy bajas del metal que se extrae, y que por esta razón se acumulan, aunque sea de manera separada, como residuos.

Es importante recalcar esto aquí, ya que en muchas ocasiones los materiales catalogados como "estériles" tienen una fracción mineral sulfurada que en ocasiones puede ser importante.

Esto es particularmente significativo en las explotaciones que datan de fines del Siglo XIX y comienzos del XX, cuando por razones de la tecnología de la época, la recuperación de metales era mala o muy mala.

Resulta prácticamente imposible extraer solamente el material económico en una mina, de tal manera que durante el proceso de la voladura de roca quedará siempre incluido material estéril (lo cual conlleva la dilución de leyes). Las causas son las siguientes:

*• **Sobrevoladura**: material que está fuera de los límites económicos del cuerpo mineralizado queda incluido en el material extraído.*

*• **Dilución interna**: material sub-económico que se encuentra incluido dentro del cuerpo económico y que no puede ser segregado.*

*• **Dilución de reemplazo o contacto**: si el contacto estéril/mineral es muy irregular (y esto suele bastante normal), el resultado será que un volumen equivalente de material estéril substituirá al material económico.*

Aunque la voladura de roca es un arte que en ocasiones roza la perfección, tampoco se le pueden pedir milagros.

Oyarzun (2011)

Conviene que definamos también otros conceptos importantes:

- **Recurso**: concentración natural de un sólido, líquido, o gas en la corteza terrestre, y cuya extracción es actual o potencialmente factible.
- **Mena**: aquel mineral susceptible de ser explotado económicamente. El mineral puede ser explotado como tal o para extraer un metal contenido en el mismo. Por ejemplo, la calcopirita ($CuFeS_2$) se explota en las minas de cobre para extraer el cobre metálico que contiene.
- **Ganga**: es la fracción mineral que acompaña a la mena pero carece de interés económico en el momento de la explotación. Por ejemplo, los silicatos o carbonatos que acompañan a los minerales de mena son la ganga.

Así, de la mina sale tanto roca mineralizada de valor económico como roca estéril del todo y/o con leyes sub-económicas. Digamos que el volumen de roca "estéril" supera ampliamente al de mineralizada. Un buen proceso minero está diseñado para separar cuanto antes el mineral o roca de interés del "estéril", que en minería subterránea a veces se emplea para rellenar las zonas ya explotadas, y a veces se dispone en superficie en una escombrera, lo cual es el caso típico en la minería a cielo abierto.



Vista parcial de la mina de Chuquicamata y la escombreras de estériles. La imagen cubre unos 5,7 km de E-W. Norte hacia arriba. Imagen Google Earth.

Analizaremos a continuación el importante tema del procesado de minerales, pieza clave en muchos de los impactos ambientales que pueden generarse en una explotación minera.

2.2.2 El procesado de minerales

Antes de entrar en materia conviene definir nuevamente algunos términos que a veces pueden resultar algo confusos por su uso indistinto:

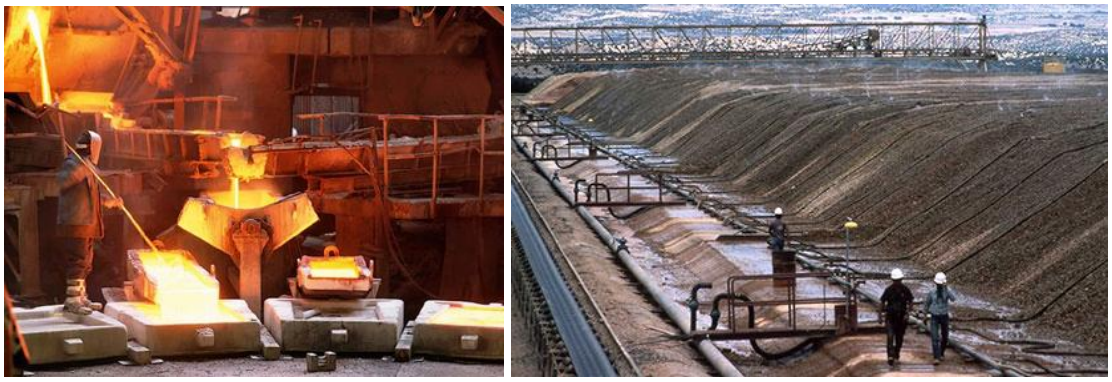
- Hasta hace relativamente pocos años, el concepto de **"metalurgia extractiva"** abarcaba todos los procesos que comprenden el procesado de minerales, esto es, molienda, y concentración por flotación o gravedad para generar un concentrado, todo esto sin transformaciones químicas. Sin embargo, el término **"mineralurgia"** ha empezado a ganar terreno en los últimos tiempos, y el problema terminológico radica en el hecho de que comprende (aproximadamente) las mismas operaciones. A efectos prácticos de esta obra, utilizaremos el primero para la minería metálica y el segundo para la minería de minerales industriales.

Otros términos que necesitamos definir son los de hidrometalurgia y pirometalurgia:

- La **"hidrometalurgia"** cubre los procesos de extracción de metales a partir del lixiviado del material **"en pila"** o **"en tanques"** (***bateas***). Aquí hay que diferenciar entre *lixiviación ácida* y *cianuración*. La primera se utiliza para minerales de cobre, oxidados y sulfuros, así como también uranio, en tanto

que la segunda, para recuperar oro. Para sulfuros se incluyen cepas específicas bacterias que catalizan el proceso de oxidación-lixiviación. En tal caso se utiliza el término *biohidrometalurgia* o *biolixiviación*.

- La **"pirometalurgia"**, que consiste en la obtención de (por ejemplo) cobre refinado a fuego (o cobre RAF). Se trata de un proceso de alta temperatura que se realiza en convertidores para la fundición de los concentrados. Sin embargo, este metal aun contiene impurezas por lo cual deberá pasar por un último proceso de purificación, la *electro-obtención*. Cabe destacar aquí que la electro-obtención también puede ser parte integral de otro circuito para el cobre, esto es, lixiviación en pila → extracción por solventes → electro-obtención, o como se conoce internacionalmente: SX-EW.



Operaciones de pirometalurgia (izquierda) e hidrometalurgia (derecha). La pila de mineral (derecha) es regada con aspersores que dispersan la solución que lixiviará el metal que se desea obtener (imágenes). En el primer caso se trata de un proceso de fundición de minerales sulfurados de cobre y en el segundo un regado de la pila con cianuro de sodio para obtener oro (imágenes[14,15]).



Cátodos de cobre generados por electro obtención (EW) (imagen[16]).

2.3 Procesado de minerales y problemas ambientales

2.3.1 Removiendo toneladas para obtener kilos (o gramos)

Señalábamos al comienzo de esta obra que la minería, especialmente la de minerales metálicos, tiene como característica las ingentes cantidades de roca que hay que remover para obtener un poco de metal a partir de estas. La razón radica en las leyes de los metales, esto es, las concentraciones a las que se encuentran en las rocas mineralizadas. Una ley de 1% Cu significa que por cada tonelada de roca mineralizada solo 10 kg corresponden al metal. Alguien podrá decir que esto es muy poco, pero si tomamos en cuenta que el cobre se encuentran presente en las rocas (no mineralizadas) en concentraciones del orden de unas 60 ppm (partes por millón), esto es, 0,006%, tendremos que reconocer que el enriquecimiento que se ha producido para dar origen a un yacimiento de cobre es inmenso. Si la ley de un yacimiento de cobre fuera de 0,6% Cu, el enriquecimiento sería de 100 veces. En el caso del oro este fenómeno es aun más significativo, ya que sus leyes suelen ser de unos pocos "gramos por tonelada".

Pero regresemos a nuestro escenario minero, y digamos que para extraer el metal de las rocas mineralizadas habremos de pasar en muchos complejos minero-metalúrgicos por la siguiente secuencia de procesos:

1. Voladura mediante explosivos para arrancar la roca mineralizada del yacimiento.
2. Transporte de dichos materiales a fases de molienda (primaria, secundaria), donde el material será progresivamente triturado hasta convertirse en una fracción muy fina.
3. Flotación de los materiales finos para separar los minerales de mena de los de ganga.
4. Fundición del concentrado.
5. Electro-refinación.



Voladura de roca (A), transporte (B), molienda (C) y flotación en celdas (D) (imágenes[17-19]).

Hasta aquí parece una secuencia relativamente simple, pero este proceso generará una proporción inmensa de residuos no deseados. A continuación pondremos un ejemplo sobre cómo funciona esto, pero antes, definamos algunos términos:

- **Mineral de cabeza**: es aquel material de mina que entrará en la planta de flotación después de haber pasado por dos o más fases de molienda.
- **Concentrado**: se trata de aquella parte del material de cabeza que tras pasar por el proceso de flotación contiene principalmente los minerales de

mena. Por ejemplo, en un yacimiento de cobre, estaremos hablando de minerales tales como calcopirita, bornita, calcosina, enargita, etc. La concentración nunca alcanzará el 100% de recuperación de los minerales de mena.

- **Cola**: es la fracción mayoritaria, que contiene los minerales de ganga. Aquí se incluye la ganga íntimamente ligada a la mena y los minerales de la roca que los contiene.

¿Cómo se realiza la concentración por flotación? El proceso se realiza en las llamadas "celdas de flotación" (ver D en la figura anterior), donde los sulfuros útiles son "flotados" mediante el uso de espumantes y colectores. Los colectores le otorgan un carácter hidrófobo a las partículas sulfuradas (permitiéndoles "flotar") y los espumantes generan una espuma a la cual se fijan las partículas que se desea flotar. Las burbujas arrastran consigo los minerales sulfurados valiosos hacia la superficie, donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas que las conducen hacia estanques especiales. Desde ahí la "pulpa" es enviada a la siguiente etapa donde el concentrado es secado y entrará en las operaciones de fundición (pirometalurgia).

Pero antes de adentrarnos en el tema de la fundición del concentrado, analizaremos los problemas relacionados con la generación del mismo. El primero y más notable bajo un punto de vista visual es el volumen de residuos que se genera a través del proceso. Estudiaremos el caso mediante un caso ficticio en el siguiente cuadro (Oyarzún y Oyarzun, 2011):

Datos:

1. Producción de mina: 20000 TM/día (mineral de cabeza: TMCAB)
2. Ley de cabeza (CAB): 0,9% Cu
3. Ley del concentrado (CON): 27% Cu
4. Ley de cola (COL): 0,1% Cu

Para determinar las toneladas de concentrado y cola tenemos que (TM: toneladas métricas; Ley de cabeza, es la del mineral de mina que entra en la planta; $\mathcal{X}$: toneladas de concentrado):

$TMCAB \times Ley_{cabeza} = Ley_{concentrado} \times TMCON + (TMCAB - TMCON) \times Ley_{cola}$
$20000 \times 0,9 = 27\,\mathcal{X} + (20000 - \mathcal{X}) \times 0,1$
$18000 = 26,9\,\mathcal{X} + 2000$
$16000 = 26,9\,\mathcal{X}$

$\mathcal{X}$ = 594,8 (toneladas de concentrado) y por lo tanto, 19405,2 toneladas de colas.

En otras palabras, el 97% del material que entró en la planta de flotación (*cabeza*) irá a parar a las balsas (*relaves*) como colas del proceso. Aquí nos enfrentamos a un problema doble, ya que por una parte los volúmenes de colas se incrementan inmensamente día a día y por otra, que no se trata de residuos completamente estériles. Por una parte contienen algo de cobre (0,1% en el ejemplo), pero aun

más notable que eso, seguramente serán ricos en pirita. ¿Por qué? Porque la pirita no es un mineral de mena (carece de valor económico actual) y por lo tanto no se flota sino que se deprime en las celdas y se incorpora a las colas.

2.3.2 Más allá del volumen de las balsas: peligros aún mayores

El drenaje ácido, aparte de ser tóxico para la vida acuática por su acidez intrínseca, suele ser rico en metales pesados. ¿Por qué? Porque facilita la lixiviación de los metales pesados contenidos en escasas proporciones en la balsa.

Así, aquí tenemos dos problemas que debemos resaltar:

1. Los volúmenes de residuos de la planta de flotación que se incrementan en una base diaria sin parar.
2. Su potencial para generar drenaje ácido y liberar metales pesados, con lo que esto significa para la vida en términos de toxicididad.



Balsa (relave) abandonada en el pueblo de Andacollo (Chile) que constituye de facto un auténtico reactor químico. Los colores verdes muestran la formación de minerales oxidados de cobre, en tanto que los marrones denotan procesos de oxidación del hierro.

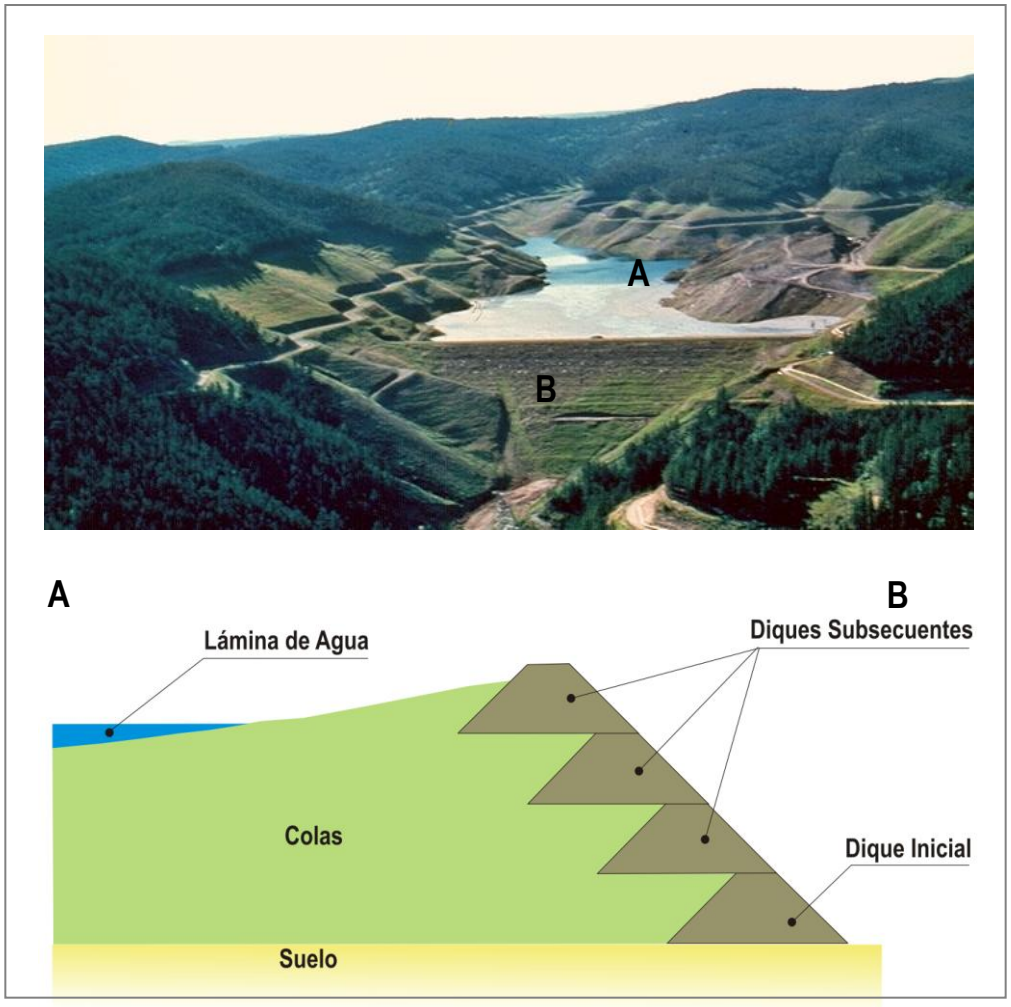


Izquierda, colas ricas en Pb, Zn y As del procesado de minerales en el antiguo Distrito Minero de Mazarrón (Murcia, España) que muestran evidencias de fuertes fenómenos oxidantes; centro y derecha, formación de charcas de drenaje ácido sobre las colas.

Pero los problemas de las balsas (*relaves*) van mucho más allá de su mero potencial para generar drenaje ácido y contaminar las aguas, ya que su

inestabilidad intrínseca (hablamos de materiales plásticos con altos contenidos en agua) puede resultar en roturas de los diques de contención y de ahí, inundar vastas áreas con el peligro que esto tiene para las poblaciones aledañas y la biota.

El clásico diseño de balsas es el llamado “aguas arriba”, el cual presenta una serie de problemas de estabilidad. Entre las más notables tenemos (WISE, 2004, 2011): 1) Que el suelo sobre el que se asienta no sea el adecuado, puede haber infiltración de aguas a través de este, y a partir de ahí ceder la base del dique de contención, lo cual puede llevar a un fallo catastrófico como ocurrió en Aznalcóllar (Sevilla, España) el 25 de Abril de 1998. 2) La mala respuesta ante la actividad sísmica, pudiendo producirse fenómenos de licuefacción durante el sismo que lleven a un fallo masivo del sistema de contención. 3) La subida del nivel del agua: esto puede llevar a dos situaciones, ambas catastróficas. En una el peso del agua puede inducir fenómenos del tipo deslizamiento rotacional cerca del dique, con pérdida total o parcial del mismo. En la otra el agua supera el dique de contención, erosiona el o los diques sucesivos llevando a la rotura de estos.



Arriba, una balsa aguas arriba (USGS, 2007); abajo, sección esquemática A-B mostrando su constitución interna (adaptada de WISE, 2004). Oyarzún y Oyarzun (2011).

Este tema no debe llevar a confusiones, las balsas colapsan y lo hacen con más frecuencia de lo que se podría querer admitir (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Por ejemplo, entre 1961 y 2011 ha habido 90 incidentes mayores en el mundo (1,8 por año), siendo el último el de la balsa de Kolontar en Hungría, el 4 de Octubre de 2010, cuando se vertieron 700.000 m^3 de barros rojos cáusticos; 10 personas murieron, 120 resultaron heridas, y 8 km^2 fueron inundados (WISE, 2011).



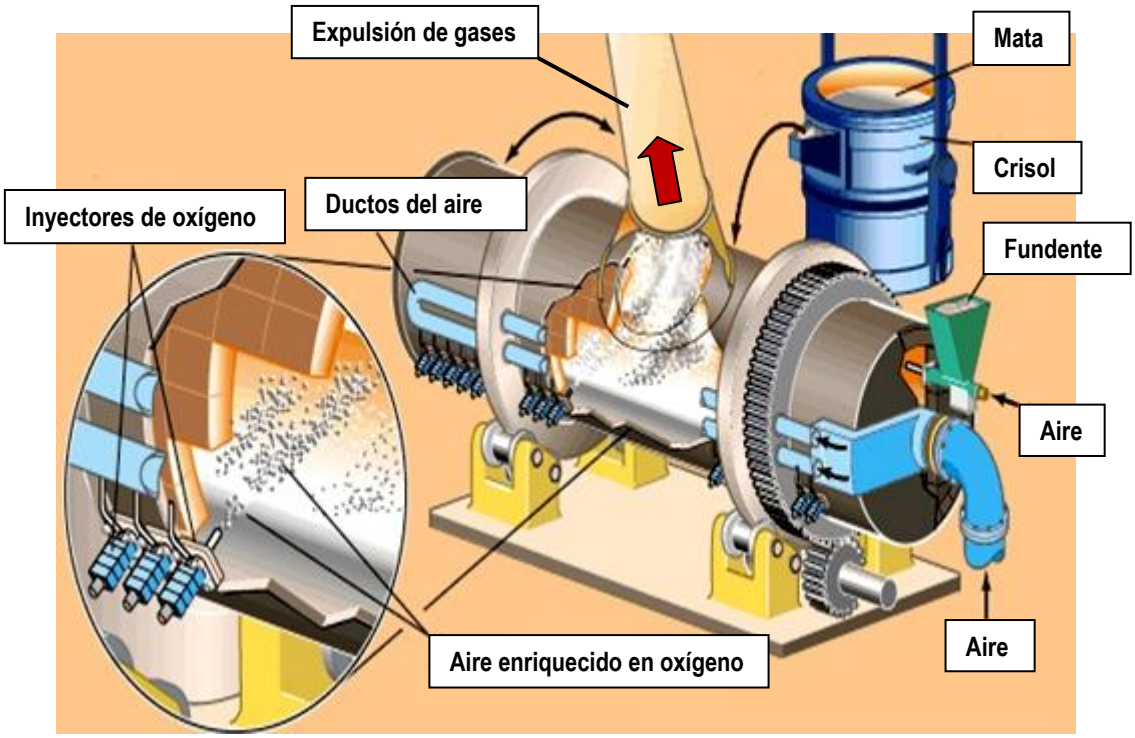
Los desastres de Aznalcóllar (España) y Kolontar (Hungría) por rotura de los diques de contención de las respectivas balsas (ver flechas) (imágenes[20,21]).

2.3.3 Después de la flotación y concentración: la fundición de sulfuros

En lo que respecta a las operaciones de fundición de concentrados, los principales problemas ambientales se relacionan con las emisiones de SO_2 y material particulado. Las razones están relacionadas con la mineralogía de los materiales que constituyen el concentrado que será fundido. Si este contiene enargita (Cu_3AsS_4) (entre otros minerales sulfurados), el proceso de fundición en condiciones oxigenadas que se lleva a cabo en un convertidor llevará inexorablemente a la oxidación del azufre, y consecuentemente a la formación de $SO_{2(gas)}$. Algo parecido ocurrirá con el arsénico, que formará $As_2O_{3(partículado)}$. A pesar de que hoy se puede abatir una parte importante del dióxido de azufre y el arsénico, siempre quedará una fracción que será expulsada por la chimenea (Oyarzún y Oyarzun, 2011).

El proceso pirometalúrgico funciona de la siguiente manera: 1) El concentrado de metal ya seco entra en el circuito de la planta de fundición. El primer paso consiste en la fundición del material en un horno reverbero, para llevarlo del estado sólido al líquido a una temperatura de 1200ºC. El producto obtenido se denomina mata (*matte)*. La mata es introducida en un convertidor (p.ej., uno tipo Pierce Smith) para la producción de cobre *blister*. El aire es soplado a la mata y el oxígeno reacciona con el azufre, cobre, hierro, y otros metales. El azufre de los sulfuros metálicos proporciona la energía necesaria para completar la conversión de mata a cobre blister. 3) El cobre *blister* (98,5% Cu) se enviará a la fase de refinado que no describiremos aquí. En las divisiones de CODELCO (Chile) se realiza un solo

proceso de fundición-conversión, utilizando un convertidor modificado tipo Teniente (CMT) (Codelcoeduca, 2011).



Convertidor tipo Pierce Smith (imagen[22]).

Así, los principales problemas ambientales derivados de la fundición de sulfuros son los siguientes:

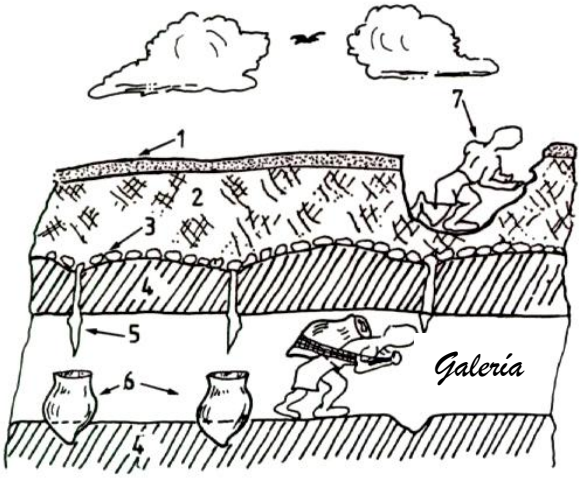
- Los gases tipo dióxido de azufre que escapan a la atmósfera.
- El particulado aéreo que escapa a la atmósfera, tema particularmente importante cuando se funden minerales que contienen arsénico junto al cobre. En el caso de las plantas que funden concentrados de zinc debemos agregar el cadmio, otro elemento de elevada toxicidad.
- Las escorias generadas por el proceso de fundición, aunque al ser materiales vitrificados, su peligrosidad ambiental es reducida.

2.3.4 Hidrometalurgia y la minería moderna

La hidrometalurgia para la recuperación de metales no es en el fondo nada nuevo para la humanidad. Ya era conocida al menos en el Siglo II (DC) en la Isla de Chipre, famosa en el mundo antiguo por sus yacimientos de cobre. Por otra parte, el uso de soluciones cianuradas para la obtención de oro se ha utilizado de manera continua desde los años 1890's. Entonces, ¿qué ha cambiado que haga esta técnica tan "moderna"? Aquí concurren dos factores, uno ambiental y el otro económico. Por una parte en la década de los años 1970's – 1980's se empezó a

exigir a las empresas que fundían sulfuros metálicos que recuperaran el dióxido de azufre expulsado por las chimeneas. En esta misma época los precios del oro comenzaron una escalada que haría que yacimientos de muy baja ley (incluso menores a 1 g/t) pudieran ser atractivos económicamente. El método más simple y económico de explotación de estos yacimientos pasó a consistir en moler la roca mineralizada a tamaños de unos 2,5 cm, formar apilamientos (pilas) con estos materiales, y lixiviarlos con cianuro de sodio.

Lo primero tuvo como consecuencia el desarrollo de una metodología de recuperación del azufre que convertía el dióxido de azufre en ácido sulfúrico. En la práctica esto significó una "inundación" del mercado con este ácido, al que no era tampoco fácil encontrarle una salida tan masiva.



Reconstrucción de una antigua operación de lixiviado en pila para la obtención de cobre, en Chipre hacia el Siglo II DC 1: Cubierta impermeable; 2: pila de rocas mineralizadas fragmentadas; 3: capa de guijarros (capa permeable); 4: techo y base de la galería de material no mineralizado impermeable; 5: estalactitas de vitriolo ($CuSO_4$); 6: ánforas para recolectar las soluciones percolantes; 7: minero (Rossi, 1990).

Aquí es cuando surge una de esas ideas simples y brillantes que mata varios pájaros de un tiro: 1) El ácido sulfúrico que produce una empresa minera puede ser utilizado por la misma para la lixiviación "en pila" de minerales. 2) Dado que el cobre obtenido por este procedimiento es posteriormente recuperado mediante electro-obtención, se elimina así el paso de la fundición, obteniéndose así un cobre "ambientalmente correcto".

Quizás si el ejemplo más notable de sinergias en el campo de la nueva minería del cobre lo constituya CODELCO Norte, con la fundición de Chuquicamata y la mina Radomiro Tomic (RT) (Distrito Minero de Chuquicamata, Región de Antofagasta, Chile) (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Chuquicamata produce ácido y RT lo consume para su tratamiento de minerales oxidados de cobre, constituyendo así un gigantesco complejo minero-metalúrgico con una producción combinada anual de

unas 875.000 toneladas de cátodos con una pureza de 99,99% Cu. Se trata de una cifra inmensa, equivalente a la producción anual de todas las minas de Australia. De esta manera se abate una parte importante de los gases de azufre (que en otras circunstancias irían a parar a la atmósfera), y se genera un subproducto que mueve una industria más "limpia". Aunque claro, no "todo" el SO_2 es abatido en el proceso. De cualquier manera el hecho es que el ácido sulfúrico derivado del abatimiento de SO_2 impulsa y sostiene una industria paralela de tratamiento de minerales oxidados de cobre, que a su vez utiliza procedimientos más "armónicos" con el medioambiente, generándose así una mayor riqueza y prosperidad (Oyarzún y Oyarzun, 2011).

El sistema de lixiviación ácida en pila es muy simple y consiste en generar un apilamiento de mineral previamente molido a tamaño 2,5 cm. Dicho apilamiento suele tener una base rectangular y un volumen que asemeja una pirámide truncada (estilo "Maya-Azteca") de escasa altura en relación a una base rectangular. Sobre la parte superior se instalan cañerías y un sistema de aspersores o riego por goteo (o ambos), que distribuyen la solución ácida sobre la pila para que percole y lixivie el cobre.



Arriba, esparcido del mineral triturado de mina y formación de las pilas de lixiviación ácida en RT. Abajo, tuberías para el transporte de la solución ácida sobre la pila y aspersores (imágenes[23]).



El Distrito Minero de Chuquicamata (Norte de Chile) (imagen Google Earth). La imagen cubre 20 km en dirección N-S, y el norte está indicado por la flecha amarilla grande.

La lixiviación en pila de minerales oxidados de cobre (como los de la mina RT) (lixiviación "ácida") se puede expresar químicamente de la siguiente manera (Oyarzún y Oyarzun, 2011):

$$CuSiO_3 \cdot 2H_2O + H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + SiO_2 + 3H_2O$$

$$Cu_4(OH)_6SO_4 + 3\,H_2SO_4 \rightarrow 4\,CuSO_4 + 6H_2O$$

$$Cu_2Cl(OH)_3 + 2\,H_2SO_4 \rightarrow 2\,CuSO_4 + HCl + 3H_2O$$

$$\Big\} \quad CuSO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-}$$

Dado que las pilas de minerales tienen una base impermeable es difícil que la solución con cobre entre en el subsuelo. Por otra parte, este hecho sería antieconómico para la empresa, que lo que desea es recuperar dichas soluciones. Esto no significa que estemos en presencia de un escenario exento de peligros ambientales, solo decimos que la empresa minera será la primera interesada en que no ocurra una rotura en la base impermeabilizada. Otro factor a tomar en cuenta son los aerosoles que pueden generarse al pasar la solución ácida por los aspersores. La dispersión de estos por el viento podría generar algún riesgo ambiental de salud laboral o de afectación a poblaciones vecinas.

Lixiviación ácida en pila 1: la visión de una empresa minera

… En los procesos de lixiviación en pila, los aerosoles ácidos se generan por el uso de aspersores, los que producen una neblina ácida con la que se riega la pila. Por el contrario, el uso de goteros en los procesos de lixiviación en pila, genera una gota gruesa, que no se levanta por efecto del viento, por la misma razón, en respuesta 5 de la Adenda 1, se señaló que para efectos de mitigar los efectos de los aerosoles sobre la Ruta 5, el proyecto contempla utilizar goteros directamente a piso de la pila, evitando así el arrastre del aerosol por el viento. Adicionalmente, en respuesta 11 de la Adenda anterior (2º párrafo), se entrega información respecto de mediciones de aerosoles efectuadas por la División Mantos Blancos, en pilas similares a la que se encuentra en proceso de evaluación, demostrándose que las emisiones que puedan generarse son muy bajas y que no tienen proyección más allá del área que cubre la pila …

Anglo American (2011)

Por su parte la cianuración en pila es un caso más complejo, el proceso está basado en la captura del oro metal como complejo de aurocianuro (Oyarzún y Oyarzun, 2011):

$2Au^0 + 4CN^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Au[(CN)_2]^- + 2OH^- + H_2O_2$

El principal reactivo utilizado para estos fines es cianuro de sodio (NaCN), un compuesto de elevadísima toxicidad aunque de escasa permanencia en el medio, ya que se descompone naturalmente en NH_4^+ y CO_3^{2-} (Shehong et al., 2005). La solución cianurada puede seguir dos trayectoria extractivas, bien a un proceso tipo CIP (*carbon-in-pulp*) en el cual la solución pasa por columnas de carbón activo donde queda retenido el oro, o bien a través del proceso Merril-Crowe, recomendable para aquellas mineralizaciones auríferas que vienen acompañadas de sulfuros (cobre, zinc).

Lixiviación ácida en pila 2: La visión ambientalista

Una pila de lixiviación es "...un depósito de material chancado similar a un cerro que se asienta sobre una base impermeabilizada constituida por PVC... rociada con una solución de ácido sulfúrico para extraer cobre...Tras cierto tiempo el ácido va percolando a través del mineral, recuperando el material de las piedras".

Desde esta inmensa estructura (7 mts.de alto x 1.5 kms.de largo) -propiedad de la compañía minera canadiense Carmen de Andacollo- un suave y permanente rocío de ácido sulfúrico cae sobre la población, lo que ha acarreado nefastos efectos sobre la calidad del suelo, aire y aguas, con los consiguientes problemas a la salud …

OLCA (1997)

2.3.5 Las escombreras de "estériles", un problema tan grande como su volumen

No podemos acabar esta sección del capítulo sin dejar de mencionar otro problema particularmente grave en la minería a cielo abierto de sulfuros metálicos: la llamada roca "estéril". Como comentábamos anteriormente, la minería a cielo abierto de sulfuros de metales de base (p.ej., Cu, Pb, Zn) genera grandes volúmenes de roca consideradas como estériles, que en muchas ocasiones, son rocas con leyes sub-económicas, esto es, se trata de rocas mineralizadas. Estos materiales serán volados, extraídos de la mina, pero no enviados a flotación. Sin embargo contienen sulfuros, en particular pirita, con lo cual volvemos al problema del potencial para la generación de drenaje ácido. Así las "escombreras de estériles" pueden constituir un problema *de facto* mayor incluso que el de las balsas (*relaves*).

Este no es solo un problema ambiental relacionado con el potencial de las escombreras para generar drenaje ácido, hablamos también de volúmenes inmensos. Por poner un ejemplo muy simple, si una mina tiene una razón de estéril a mineral de 3:1, significa que por cada tonelada enviada a planta tres irán a las escombreras. Así, si diariamente se envían a planta 50.000 toneladas de mineral, 150.000 pasarán a estériles. Esto no es así en una base "estrictamente" diaria, pero sí lo es en el conjunto.



Escombreras en mina Escondida, Desierto de Atacama, Chile (imagen[24]). Compare tamaños entre las grandes escombreras y una pista de vehículos (carretera).

2.4 Problemas ambientales de la minería no metálica

La minería de "no metálicos" es aquella en la que se incluyen desde minerales muy valiosos como los diamantes, materiales energéticos como el carbón o las arenas, lutitas y pizarras bituminosas, minerales de uso industrial como el yeso o las arcillas, las rocas ornamentales, y los áridos de construcción (arenas y gravas). Esta minería comparte con la metálica algunos impactos ambientales potenciales. Rara vez su explotación se lleva a cabo mediante minería subterránea (relaciones costes-beneficios) siendo mucho más comunes las canteras o cortas, de forma que el impacto paisajístico es, o puede ser similar a los descritos con anterioridad. Además, algunos de estos productos, como el carbón, pueden generar también el problema de formación de drenaje ácido, ligado fundamentalmente a la presencia de pirita en estos materiales. Describimos a continuación impactos específicos relacionados con algunos de los materiales de este tipo, sin pretender ser exhaustivos, puesto que la variabilidad es elevada en función del tipo de explotación y de las técnicas de tratamiento que se apliquen tras ésta.



Minería a cielo abierto de no-metálicos. Arriba izquierda, la mina Diavik de diamantes en Canadá, a la derecha, una cantera de granito en Vermont (USA); abajo izquierda, mina de carbón en Alemania, a la derecha, mina de arenas bituminosas en Canadá (imágenes[25-28]).

<u>*La explotación de las sales sódicas y potásicas*</u> suele producir un grave problema de aumento de salinidad de las aguas del entorno de las explotaciones. A menudo la explotación de estos productos genera volúmenes importantes de escombreras

con concentraciones relativamente altas de estos productos que quedan a la intemperie, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia en las mismas con disolución parcial de estos compuestos y liberación de los mismos a los cauces naturales de la zona. Del mismo modo, la infiltración desde las escombreras hacia el subsuelo de estas sales produce efectos de contaminación de las aguas subterráneas.



Antiguas explotaciones de sales potásicas de Cardona (España) (imagen[29]).

Los materiales silíceos tienen también un impacto significativo durante la explotación. El principal problema se deriva de que la sílice pulverizada es un agente contaminante atmosférico de importancia, por su potencial de afectación a la salud de las personas y ganado, al producir problemas pulmonares graves como la silicosis. El polvo de sílice se genera en la trituración de materiales silíceos, para la obtención de áridos, o en la obtención y tratamiento de diatomitas.

La cocción de los materiales cerámicos es también un tema de relevancia ambiental, ya que la materia prima arcillosa a menudo contiene compuestos fluorados, en mayor o menor proporción. Durante la cocción de estos materiales para obtener productos cerámicos, es muy frecuente la formación de ácido fluorhídrico, agente contaminante muy agresivo para los pulmones, y mucosas en general, de la población que puede verse afectada por su presencia en la atmósfera. Como a menudo este tipo de fábricas se localizan en las proximidades de poblaciones, su potencial de afectación a poblaciones humana es alto.

Industrial sand and gravel, often called "silica," "silica sand," and "quartz sand," includes sands and gravels with high silicon dioxide (SiO_2) content. These sands are used in glassmaking; for foundry, abrasive, and hydraulic fracturing (frac) applications; and for many other industrial uses. The specifications for each use vary, but silica resources for most uses are abundant. In almost all cases, silica mining uses open pit or dredging mining methods with standard mining equipment. Except for temporarily disturbing the immediate area while mining operations are active, sand and gravel mining usually has limited environmental impact.

USGS (2011)

El corte de la roca ornamental es un proceso complejo, ya que ésta debe ser cortada en bloques regulares para su mejor aprovechamiento en las fábricas que preparan estos materiales para su uso industrial. Las técnicas de corte son muy variadas, en función de muy diversos parámetros, desde el tamaño de la explotación al tipo de materiales concretos explotados. Algunas de estas técnicas son relativamente inocuas ambientalmente, como el corte con hilo diamantado, pero otras producen impactos significativos, como puede ser el corte de granito mediante lanza térmica.



Corte de granito con hilo diamantado en una cantera (imagen[30]).

Esta última técnica emplea un tipo de lanzallamas oxiacetilénico para cortar el granito de forma relativamente rápida, económica y efectiva, pero al no poder usar agua para limitar las emisiones de polvo (en buena parte silíceo, además), genera una gran cantidad de partículas que quedan en suspensión y pueden afectar a áreas pobladas próximas. Además el ruido que se genera es muy alto, y puede también llegar a ser audible desde el entorno menos inmediato de la explotación. Debido a sus múltiples problemas este procedimiento se encuentra en franco declive.

Los productos mineros de interés energético más comunes son el carbón y las arenas bituminosas. Los "carbones" como señalábamos al comienzo tienen el problema de sus contenidos en pirita que pueden generar drenaje ácido en las escombreras cercanas a los lavaderos. Por su parte las "arenas bituminosas" son un problema en regla, y el sitio principal de estas preocupaciones se localiza en Alberta (Canadá) (Oyarzún y Oyarzun, 2011). La viscosidad del bitumen impide que este pueda fluir de forma natural por pozos, y por lo tanto hay que recurrir a tecnologías diferentes (Rahnama et al., 2008). Si el depósito de bitumen está cerca de la superficie (< 70 m) se remueve la sobrecarga y se accede a las arenas bituminosas directamente mediante un proceso netamente minero. Estas más tarde son lavadas con agua caliente en las plantas de extracción para recuperar el bitumen, con una recuperación del 80%.

> *Once considered too expensive, as well as too damaging to the land, exploitation of **Alberta's oil sands** is now a gamble worth billions …*
>
> *… Nowhere on Earth is more earth being moved these days than in the Athabasca Valley. To extract each barrel of oil from a surface mine, the industry must first cut down the forest, then remove an average of two tons of peat and dirt that lie above the oil sands layer, then two tons of the sand itself. It must heat several barrels of water to strip the bitumen from the sand and upgrade it, and afterward it discharges contaminated water into tailings ponds like the one near Mildred Lake.*
>
> *Kunzing (2009)*



Izquierda, operación minera a cielo abierto de gran escala en Alberta (Canadá) para recuperar bitumen cercano a la superficie. Note el color de los materiales (imagen[31]). A la derecha, desolación en las áreas mineras de Alberta (WWF, 2008).

De acuerdo a un informe del WWF (2008), los principales problemas ambientales relacionados con las explotaciones de Alberta incluyen daños a ecosistemas delicados y globalmente importantes, la pérdida de vida salvaje y un uso no sostenible de los recursos de agua. Por otro lado, las naciones indígenas que viven y pescan aguas abajo de las minas de arenas bituminosas en la zona de Fort Chipewyan empiezan a mostrar serias preocupaciones por los niveles de toxinas en el agua y los peces, y han comenzado una demanda legal contra el Gobierno de Alberta (WWF, 2008). Recordemos además que las arenas bituminosas ocupan 140.000 km^2 (un área más grande que Inglaterra) de bosque boreal primario, un área que en la actualidad está ocupada por inmensas minas a cielo abierto, plantas de tratamiento de arenas, escombreras, balsas (relaves) con aguas de dudosa calidad ambiental, y oleoductos distribuidos por todo el territorio.

2.5 La minería aluvial del oro, demagogia ambientalista y pobreza

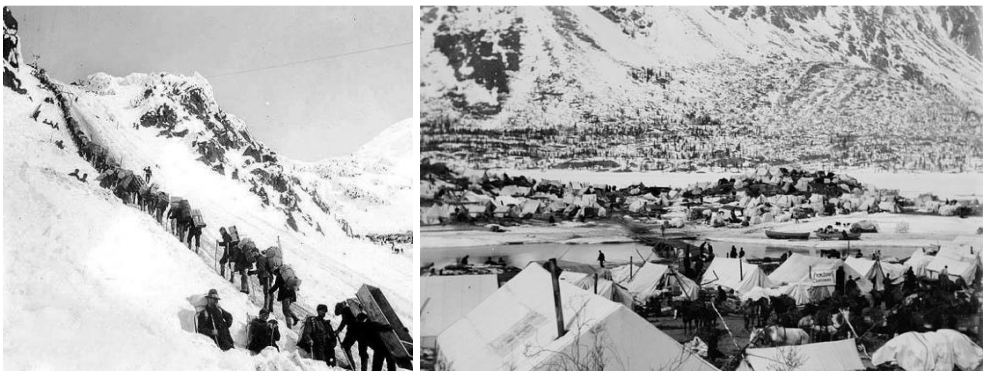
There's a lady who's sure all that glitters is gold, and she's buying a stairway to heaven … (Jimmy Page & Robert Plant) … All that glitters is not gold … (Mark Twain)

La minería aluvial del oro fue considerada en el Siglo XIX como una auténtica aventura. Bien conocida es la "fiebre del oro" de California allá por los años 1848-1855, cuando miles de potenciales mineros se desplazaron hacia allí en busca de fortuna desde todos los rincones del mundo.



Mineros del oro (49'ers) en California (imagen[32]).

No sería la única aventura del oro, ya que en 1896-1899 se desarrollaría otra "fiebre del oro", con idénticas características a la de California, solo que esta vez, en las inhóspitas tierras del Yukón en Canadá. No solo murieron muchos en el intento, sino que para la mayoría, todo fue al igual que en California, un gran desengaño. Pero "ese" es el poder de atracción que posee el oro, particularmente entre aquellos que teniendo nada que perder, porque nada tienen, se abalanzan hacia lo desconocido cuando alguien grita: *oro, he encontrado oro*.



Mineros del Yukón. A la izquierda la llamada Chilkoot Trail que llevaba a los campos auríferos; a la derecha, un campamento de mineros (imágenes[33,34]).

Hoy en día la pobreza ha arrastrado a miles y miles de trabajadores a la Amazonía, donde se desarrolla otro de los dantescos espectáculos que proporciona la minería aluvial del oro. Se estima que en términos globales en Iberoamérica trabajan en este tipo de minería alrededor de 1 millón de personas, que anualmente producen unas 200 toneladas de oro (Veiga, 1997).

Dice este último autor que la contaminación por mercurio ha sido utilizada por diferentes sectores de la sociedad como un "villano útil", mientras que las comunidades afectadas han sido ignoradas. Mitos y tabúes sobre la contaminación por mercurio crean histeria y ayudan a los intereses ocultos de ciertos grupos económicos. De esta manera se amplía la brecha entre los mineros artesanales y la sociedad organizada, creándose más ilegalidad.

Se puede leer en muchas páginas administradas por grupos ambientalistas (o como equivocadamente se autodenominan: "ecologistas") que una sola gota de mercurio puede contaminar miles de litros de agua. Uno se pregunta cuando lee estas cosas si se trata de demagogia o simple ignorancia en ciencias básicas como la química. Aclaremos algunos puntos al respecto. Para hablar de "toxicidad" de un elemento o compuesto químico, primero debemos remitirnos a la "especiación" de dicho metal, metaloide o compuesto, es decir, entender en qué forma química se encuentra, ya que no todas afectan (si es que afectan) la salud humana o de la biota.

Hay tres especies mercuriales que deben preocuparnos, el mercurio en fase gaseosa (Hg_{gas}), el mercurio oxidado (Hg^{2+}) y sobre todo, el metilmercurio (CH_3Hg^+). Sin embargo, el mercurio que se utiliza en la minería del oro artesanal no corresponde a ninguna de estas especies, hablamos de mercurio en estado metálico (Hg^0).



Uso de mercurio metálico para la amalgamación de oro en una batea (gold pan) (imágenes[35]).

De hecho, uno de los autores (*PH*) ha podido observar como en un intento de demostrar la inocuidad del mercurio algún trabajador ha ingerido mercurio metálico, y Veiga (1997) relata episodios equivalentes.

Hg (mercury zero)

The elemental form of mercury, appearing as a silver liquid when contained at room temperature

· Easily volatilizes in to the atmosphere and remains there from three months to two years
· Not very water soluble, thus it does not readily wash out of the atmosphere during rainfall
· Removed from the atmosphere very slowly after converting mostly to HgII

Hg (II) (mercury two)

· Ions known as mercury salts
· Water soluble and easily attached to particles
· Readily washes out of the atmosphere

MeHg (methylmercury)

· The organic form of mercury
· Volatile
· Very water soluble
· Readily washes out of the atmosphere
· Bioaccumulative

Wisconsin Department of Natural Resources (2011)

¿Estamos animando aquí a los lectores a ingerir mercurio metálico? Solo alguien desquiciado lo haría y no es nuestro caso. Todo lo que intentamos mostrar es que contra la demagogia "de las gotas que contaminan miles de litros de aguas limpias de contaminantes", el tema es mucho más complejo. Para empezar, el mercurio metálico "no" se disuelve fácilmente en agua. Esto se puede comprobar deslizando una gota de mercurio en un vaso de agua. Esta se aposentará en el fondo y eso será todo. Para hablar de "contaminación" el mercurio debería estar "disuelto" en agua en su forma catiónica (oxidada) como Hg^{2+} o como metilmercurio (CH_3Hg^+). Al respecto, recomendamos la lectura del apartado 5.1 (*El Distrito Minero de Almadén, un caso de contaminación milenaria por mercurio*) para completar los conocimientos en un tema tan importante como este.

Infinitamente más desastroso para el medioambiente son las labores de minería en seco o húmedo en la Amazonía. Las primeras porque destrozan la selva tropical, las segundas porque perturban los fondos de los cursos fluviales levantando materiales del lecho.



Izquierda, deforestación para actividades mineras auríferas en Brasil; derecha, operación de dragado para oro en un río de la Amazonia peruana (imagen[36]).

En otras condiciones y territorios la minería aluvial del oro es una actividad poco perturbadora del medioambiente, ya que su propio carácter artesanal, en explotaciones muy pequeñas, impide generar graves perturbaciones.



Explotaciones auríferas artesanales en Chile austral. Arriba, canoa con rifles para concentración primaria de minerales pesados (Lonquimay); abajo izquierda explotación de gravas auríferas en Huamaqui (Cordillera del Queule); a la derecha, oro de Lonquimay en una challa (batea chilena).

Ya para terminar, nos quedamos con el análisis final sobre esta materia que realizan Oyarzún y Oyarzun (2011) en su libro sobre minería y sostenibilidad para la minería aluvial amazónica:

Seamos claros en esta materia, la actividad artesanal del oro no es sostenible, solo permite un cierto nivel de subsistencia mínima a la mayor parte de la gente que ahí trabaja. Distorsiona culturalmente las regiones donde se desarrolla y genera nuevas bolsas de pobreza. Entre tanto,

se genera un deterioro ambiental notorio, no tanto por el uso (y mal uso) del denostado mercurio metálico (quizás si la parte menos importante de esta historia) sino por la intrusión antrópica en zonas de un marcado valor biológico. El uso de dragas para remover el fondo de los ríos, o la deforestación para acceder a los niveles auríferos, son situaciones de máxima preocupación ambiental.

Se trata de una actividad que hace "ricos" de la misma manera que lo hace "la lotería", esto es, a unos pocos, mientras el resto sigue estancado en la miseria. Aquí está la parte clave del tema, porque se mire como se mire, si una actividad minera no es capaz de generar riqueza transformable y duradera, entonces la actividad no es sostenible. Pero esto nos retrotrae a la otra cuestión importante: qué hacer con los mineros que trabajan en este sector. No basta con decir que la minería artesanal del oro no es sostenible, hay que ofrecer soluciones alternativas. Los gobiernos locales, los salones de Bruselas y las ONGs tienen la palabra. Pero ojalá que todos recuerden que aquí no solo está en juego uno o varios ecosistemas, sino que también personas que se merecen, por qué no, un futuro decente.

Bibliografía

Atención: *Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.*

Anglo American, 2011. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Mercedes. Adenda nº 2, https://www.e-seia.cl/archivos/ADENDA_2_-_Mercedes_v.3.pdf

Atlas Copco, 2007. Mining Methods in Underground Mining. http://www.atlascopco.com/us/news/applicationstories/reference_book_about_underground_mining_methods_in_a_new_edition.asp

Blanchard, R., 1968. Interpretation of Leached Outcrops. Nevada Bureau of Mines, Bulletin 66, 196 pp.

CODELCO, 2011. Divisiones: El Teniente. Codelcoeduca, CODELCO-Chile, https://www.codelcoeduca.cl/codelco/divisiones/t-teniente.html

Codelcoeduca, 2011. Recuperación y reutilización de los gases producidos en el proceso de fundición. Codelcoeduca.cl, https://www.codelcoeduca.cl/minisitios/sustentabilidad/reutilizar/produccion.html

Gupta, M.Z., 2010. An investigation into the leaching of enargite under atmospheric conditions. Master of Applied Science Thesis, Robert M. Buchan Department of Mining, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada. 174 pp, https://qspace.library.queensu.ca/bitstream/1974/5665/1/Gupta_Mark_Z_201005_MASc.pdf

Kunzing, R., 2009. The Canadian Oil Boom. National Geographic, Feature Article, http://ngm.nationalgeographic.com/2009/03/canadian-oil-sands/kunzig-text

OLCA, 1997. Contaminación por aspersión de ácido sulfúrico en pila de lixiviación minera, Chepiquilla - Andacollo, Región de Coquimbo. Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales. http://www.olca.cl/oca/chile/chepiquilla.htm

Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/Libro_Mineria_Sostenible.pdf

Oyarzun, R., 2011. Introducción a la Geología de Minas: Exploración y Evaluación. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/Libro_Geologia_Minas.pdf

Rahnama, F., Elliott, K., Marsh, R.A. y Philp, L., 2008. The Alberta oil sands: reserves and supply outlook. In: Letcher, T. (Ed.), Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet, Elsevier, 59-75.

Rossi, G. 1990. Biohydrometallurgy. McGraw-Hill, NY, 609 pp.

Shehong, L., Baoshan, Z., Jianming, Z., Xiaoying, Y. y Binbin, W., 2005. Natural cyanide degradation and impact on Ili River drainage areas from a goldmine in Xinjiang autonomous region, China. Environmental Geochemistry and Health, 27, 11-18.

USGS, 2007. Arsenic Contamination from hard rock mining - Whitewood Creek - Belle Fourche River - Cheyenne River System, Western South Dakota. http://toxics.usgs.gov/photo_gallery/whitewood_creek.html

USGS, 2011. Silica: Statistics and Information. US Geological Survey, Minerals Information, http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silica/

Veiga, M.M., 1997. Mercury in artisanal gold mining in Latin America: facts, fantasies and solutions. UNIDO - Expert Group Meeting - Introducing new technologies for abatement of global mercury pollution deriving from artisanal gold mining, Vienna, http://www.facome.uqam.ca/pdf/veiga_02.pdf

Wisconsin Department of Natural Resources, 2011. Mercury - The Element. The Official Internet Site for the Wisconsin Department of Natural Resources, http://dnr.wi.gov/org/caer/cea/mercury/element.htm

WISE, 2004. Safety of tailings dams. http://www.wise-uranium.org/mdas.html

WISE, 2011. Chronology of major tailings dam failures. http://www.wise-uranium.org/mdaf.html

World Mine Cost Data Exchange, 2011. Carbon dioxide (CO_2) emissions model for World copper and iron ore mines. http://www.minecost.com/carbon.htm

WWF, 2008. Unconventional oil: scraping the bottom of the barrel? The Co-Operative, bank, insurance, investments, http://assets.wwf.org.uk/downloads/scraping_barrell.pdf

Fuentes de las imágenes (a Septiembre-Octubre de 2011)

1. http://194.132.104.143/Websites%5CRDE%5Cwebsite.nsf/$All/751129377B172073412567440058CC3F?OpenDocument
2. http://photos.mongabay.com/en/Open_Pit_Mine.htm
3. http://www.odec.ca/projects/2004/weik4t0/public_html/under.html
4. http://minerals.usgs.gov/east/humid/
5. http://www.pebblescience.org/pebble_mine/acid_drainage.html
6. http://www.vista-start-smart.com/html/body_mining_ug_drill_simulator.html
7. http://www.westrac.com.au/pages/productsubfamily.aspx?psfid=13866081
8. http://www.mindat.org/photo-397087.html
9. http://www.engg.ksu.edu/chsr/outreach/tosc/sites/galena.html
10. http://kaganga.com/i-want-to-know/grasberg-mine-in-indonesia-big-hole-mine.html
11. http://www.yukon-news.com/news/11195/
12. http://www.vulgare.net/berkeley-pit-butte-montana/
13. http://www.gener.cl/Amigosdelaenergia/image/centrales/a10_tocopilla.html
14. http://www.hardwaresource.com/hinge-resource-center/hinge-information/hinge-history/hinge-fabrication-methods/
15. http://metallurgium.com/projects.html
16. http://www.shalinaresources.com/cusx-ew-plant.aspx
17. http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-m02-metals.htm
18. http://www.stockhouse.com/blogs/viewdetailedpost.aspx?p=85934
19. http://www.shell.com.pk/home/content/pak/products_services/solutions_for_businesses/lubricants/case_study/
20. http://www.wise-uranium.org/mdaflf.html
21. http://daveslandslideblog.blogspot.com/2010/10/reports-suggest-that-kolontar-dam.html
22. http://www.dundeeprecious.com/English/operations/processing/tsumeb-smelter/smelting/default.aspx
23. http://www.blacklineint.com/id3.html
24. http://www.theaustralian.com.au/business/mining-energy/bhp-billiton-approves-escondida-copper-project/story-e6frg9dx-1226031253078
25. http://www.gran-angular.net/los-7-hoyos-terrestres-mas-impresionantes/2007/09/13/
26. http://www.uvm.edu/~envprog/formslinks/Vermont%20Mining/Vermont%20Mines/8001%20Barre%20Granite,%20Rock%20of%20Ages.jpg
27. http://pcgladiator.blogspot.com/2009/01/germanys-coal-mines.html
28. http://malcolmallison.lamula.pe/2011/01/15/represas-de-residuos-letales-de-la-mineria-de-arenas-bituminosas-de-canada/malcolmallison
29. http://viajarsinprisa.net/viajar-sin-prisa-a-la-mina-de-sal-cardona-barcelona/
30. http://www.coditec.es/es/servicios/corte_con_hilo.php
31. http://www.guardian.co.uk/business/2010/jan/18/shell-shareholders-fury-tar-sands
32. http://www.legendsofamerica.com/ca-argonauts.html
33. http://en.wikipedia.org/wiki/Klondike_Gold_Rush
34. http://www.sheppardsoftware.com/canadaweb/factfile/Unique-facts-Canada7.htm
35. http://upsidedownworld.org/main/nicaragua-archives-62/2382-gold-fever-artisanal-and-industrial-extraction-in-the-nicaraguan-mining-triangle
36. http://cinabrio.over-blog.es/article-transamazonica-del-sur-unas-de-cal-otras-de-arena-66898137.html

3.1 Atmósfera y contaminación

3.1.1 Hechos, buenas intenciones y una importante dosis de hipocresía

Quienes vivimos en o cerca de una gran urbe estamos acostumbrados a la idea de la contaminación del aire. Cualquier noción de aire puro (si es que tal concepto existe) desaparece del todo en estas áreas. No puede ser de otra manera, ya que mientras subsista el tráfico rodado que quema diesel o gasolina, los problemas seguirán ahí. Lo mismo se aplica a las calefacciones que queman carbón y al humo de las chimeneas de los cinturones industriales. La verdad es que resulta difícil percatarse del grado de contaminación mirando al cielo en un día despejado, ya que la imagen que se obtendrá es la de un engañoso color azul claro. Es mirando horizontalmente que los problemas afloran:



Imagen de Madrid mostrando la contaminación atmosférica que nos rodea y cubre (imágenes[1,2]).

No es un tema secundario, pero es una materia que las autoridades prefieren ignorar en la medida de lo posible, ya que la solución le costaría una elección a cualquiera que la implementase: suprimir de manera significativa el tráfico rodado.

Infinitamente más simple resulta prohibir el humo del cigarrillo, aunque claro está, en materia de contaminación, esto recuerda al viejo cuento “del chocolate del loro”. En este sentido, y aunque suene casi gracioso, al ciudadano se le presentan tales medidas como un “gran avance” en materia de salud. Al respecto cabe preguntarse no obstante como puede prometerse al ciudadano espacios “sin humo” (si este está ahí aunque no se vea) o donde “sólo se comparte oxígeno”. En relación a estos últimos dos comentarios, el oxígeno representa tan solo un 20% de los gases

que respiramos (la mayor parte, un 78%, es nitrógeno); segundo, si el aire que respiramos fuera principalmente oxígeno, viviríamos en una atmósfera altamente inflamable. Por ejemplo, durante el programa Apolo de la NASA, cuando aun se probaba el módulo de comando de la Apolo 1, se desató un incendio que acabó con la vida de los astronautas Virgil Grissom, Edward White y Roger Chaffee. Posteriormente una comisión investigadora determinó que la tragedia se había originado como consecuencia del oxígeno puro al 100% que entró en combustión con una chispa provocada por un cortocircuito en uno de los paneles de control de la nave (p.ej., Greene, 2011). Por eso, si queremos educar a la población de una país, sería conveniente que no se realizaran campañas que difunden errores conceptuales como el de la figura de abajo. Lo que respiramos es "aire", esto es, una mezcla de gases.



Parte de un anuncio sobre el oxígeno para pegar en las paredes de los edificios públicos (imagen[3]).

Se supone que vivimos en la era de la información, aunque cabe preguntarse si más bien no deberíamos llamar a ésta la era de la (*des*)información. Es verdad, existen decenas y cientos de miles de páginas web sobre casi cualquier tema, aunque claro está, resulta difícil para el ciudadano de a pié determinar la fiabilidad de la información que se exhibe en estas.

> *… Hemos progresado mucho en el control de emisiones, tanto en los lugares de trabajo como por ejemplo las relacionadas con el consumo de carbón que produjeron los episodios de smog en Londres en los años 1950-1952. Sin embargo, el dramático incremento en las emisiones de tráfico en los últimos 50 años es responsable de un nuevo y serio problema de polución, especialmente en las ciudades, y es mencionado frecuentemente en la prensa: "desde 1990 el transporte en España ha incrementado sus emisiones un 80%" (El País 19/11/2006). En la última década detallados estudios epidemiológicos, basados en datos de medición tomados durante décadas, han finalmente probado que la inhalación del aire contaminado en las ciudades causa no solo efectos temporales (como ataques de asma) sino también crónicos que reducen la vida media de las personas (8 meses/persona en Europa) ….*
>
> *Moreno (2007)*

Volviendo con el tema de la circulación de coches por las grandes ciudades, aparte del gravísimo problema de los aerosoles, está el tema de los compuestos oxidados de nitrógeno que explicaremos a continuación.

En condiciones normales el enlace covalente que une los dos átomos de nitrógeno es virtualmente imposible de destruir, pero si agregamos energía al sistema, como ocurre en la cámara de combustión del cilindro en el motor de un coche, el enlace se rompe y el nitrógeno formará compuestos del tipo NO_x con el oxígeno que entra en la cámara. Estos gases no solo ayudan a la formación de ácido nítrico en la atmósfera (HNO_3), sino que su inhalación a través de las vías respiratorias tiene importantes consecuencias para la salud humana.

El tema de la contaminación atmosférica es más que un mero asunto de química ambiental, ya que tiene importantes matices políticos y económicos íntimamente ligados al mismo.

… El secretario general para la Prevención de la Contaminación de Medio Ambiente, Arturo Gonzalo Aizpiri, admite el problema: "No hay duda sobre la gravedad de la contaminación del aire. Incumplimos las directivas de forma reiterada en las grandes ciudades, y esto genera problemas de salud".

El tráfico y las industrias emiten los contaminantes. Los más problemáticos son las partículas microscópicas que se quedan suspendidas en el aire (que causan problemas respiratorios y cardiovasculares) y el dióxido de nitrógeno (afecta al sistema inmune y al respiratorio) …

Méndez (2006)



Dos ciudades con graves problemas de contaminación atmosférica. A la izquierda Los Angeles (California); a la derecha, Santiago de Chile, que ni siquiera se ve en la foto (imágenes[4,5]).

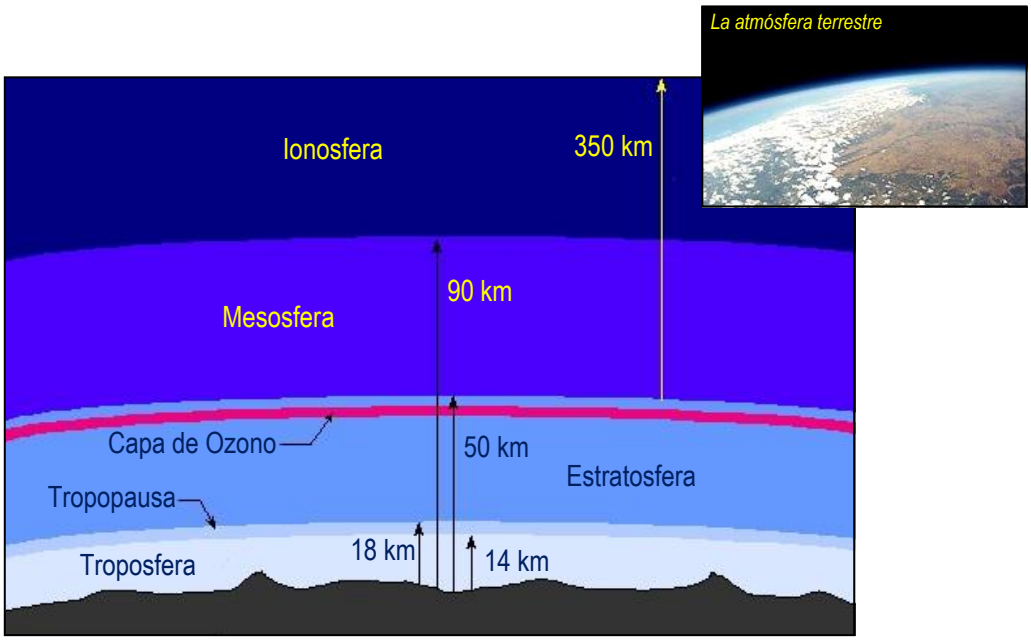
Impedir que los coches circulen sin restricciones y contaminen está en manos de la clase política, pero no es una decisión fácil, ya que una restricción importante (y sobre todo "real") a la circulación tendría además repercusiones económicas (no es exactamente un "incentivo" a la venta de coches), sin contar con la airada respuesta de los ciudadanos.

Esto nos lleva a reflexionar sobre el tema de sociedad y contaminación. Los ciudadanos tienen derecho a vivir en espacios limpios, pero también tienen (o deberían tener) el derecho a elegir de alguna manera "cómo" quieren vivir. Para eso hay que empezar por la información. El ciudadano debe ser informado sobre la existencia y consecuencias de la contaminación. En este sentido, si la idea es que los ciudadanos no están cualificados para tomar decisiones, pues sigamos como estamos y mantengamos una sociedad de adultos y niños pequeños, donde los

primeros disponen y los segundos acatan. En los Estados Unidos de Norteamérica, muchas leyes estatales son votadas directamente por los ciudadanos, aprovechando un proceso electoral de alcance estatal o federal. En Suiza se realizan procesos de votación similares. Eso es democracia, lo otro se puede llamar como se quiera, pero no pasa (en la práctica) de ser una elección (o nominación) de "tutores" por un determinado número de años.

3.1.2 La tenue y delgada atmósfera respirable que nos cobija

La atmósfera recubre la parte sólida (litosfera) y líquida (hidrosfera) de la Tierra. En la atmósfera se pueden diferenciar una serie de capas concéntricas (de abajo hacia arriba): 1. La troposfera (y tropopausa). 2. La estratosfera. 3. La mesosfera. 4. La ionosfera.



Estructuración en capas de la atmósfera terrestre (imágenes[6,7]).

La Troposfera constituye la primera capa de la atmósfera, y se encuentra en contacto con la superficie de la Tierra, alcanzando una altura de unos 14 km, que varía entre el Ecuador y los Polos. En los niveles inferiores se producen los fenómenos atmosféricos, y se halla un 80% del agua de la atmósfera, que puede estar en forma de vapor hasta aproximadamente los 14 km de altura. En los polos descienden grandes cantidades de aire frío, mientras que en el ecuador se elevan enormes masas de aire caliente y húmedo. Estas masas de aire y de vapor se mueven a grandes velocidades, entre temperaturas extremas de 40ºC y -75ºC. Sobre esta capa se encuentra *la Tropopausa*, que actúa como una zona de transición entre la troposfera y la estratosfera.

La Estratosfera alcanza hasta los 50 km. En su región inferior la temperatura es estable entre los -50ºC y los -60ºC. La humedad del aire y la velocidad del viento disminuyen bastante rápidamente a partir de la tropopausa. Por esta razón, la estratosfera está prácticamente libre de nubes. La estratosfera tiene gran importancia en la vida terrestre, ya que en su zona superior se forma el ozono (O_3). La radiación ultravioleta del Sol induce la formación de este gas, y este proceso hace que se consuma y que alcance la Tierra lo suficientemente debilitada como para permitir el desarrollo de la vida.

La Mesosfera constituye la siguiente capa, que alcanza hasta unos 90 km. En esta región la temperatura disminuye a -80º C, y con ello alcanza su punto más bajo. La mesosfera es la región de las nubes nocturnas luminosas. Se parecen a los cirros, pero a veces pueden aparecer azuladas o rojizas. Posiblemente estas nubes están formadas de polvo, arrojado a grandes alturas por violentas erupciones volcánicas. Por ejemplo, después de la erupción del Krakatoa (1883) pudieron verse relucientes nubes nocturnas durante varios meses.

La Ionosfera es la capa superior, que se extiende hasta 350 km de altura, y alcanzan temperaturas de 1000 a 1500ºC. Este calor espacial debe atribuirse sobre todo a la radiación ultravioleta, que produce en esta zona la disociación de las moléculas gaseosas y la carga eléctrica de sus partículas ionizadas. La densidad de los gases es tan pequeña que el calor generado es incapaz de transmitirse, por lo que un astronauta se helaría en esta atmósfera "caliente". Por lo tanto, y de acuerdo con los conceptos terrestres, la temperatura de esta capa (a veces llamada "termosfera") es un fenómeno físico para cuya explicación no es del todo suficiente la teoría cinética de los gases. Es en la parte superior de la ionosfera donde se produce el fenómeno de las auroras boreales.



La Aurora Boreal. En las regiones polares las partículas cargadas portadas por el viento solar son atrapadas por el campo magnético terrestre incidiendo sobre la parte superior de la ionosfera, dando lugar a la formación de auroras (imagen[8]).

3.1.3 Calentamiento de la atmósfera y movimiento de contaminantes

Una parte de las radiaciones del Sol que llegan a la atmósfera son absorbidas, mientras que otra parte son reflejadas. La presencia de la atmósfera impide que se den grandes variaciones de temperatura. Este efecto amortiguador se denomina "efecto invernadero". Se le da este nombre porque realiza un trabajo semejante al de los invernaderos, cuyos cristales son altamente transparentes a las radiaciones solares, y muy opacos a las de la banda térmica de la Tierra (permiten la entrada, pero se oponen a la salida).



Esquema simplificado sobre las bases del efecto invernadero (imágenes[9,10]).

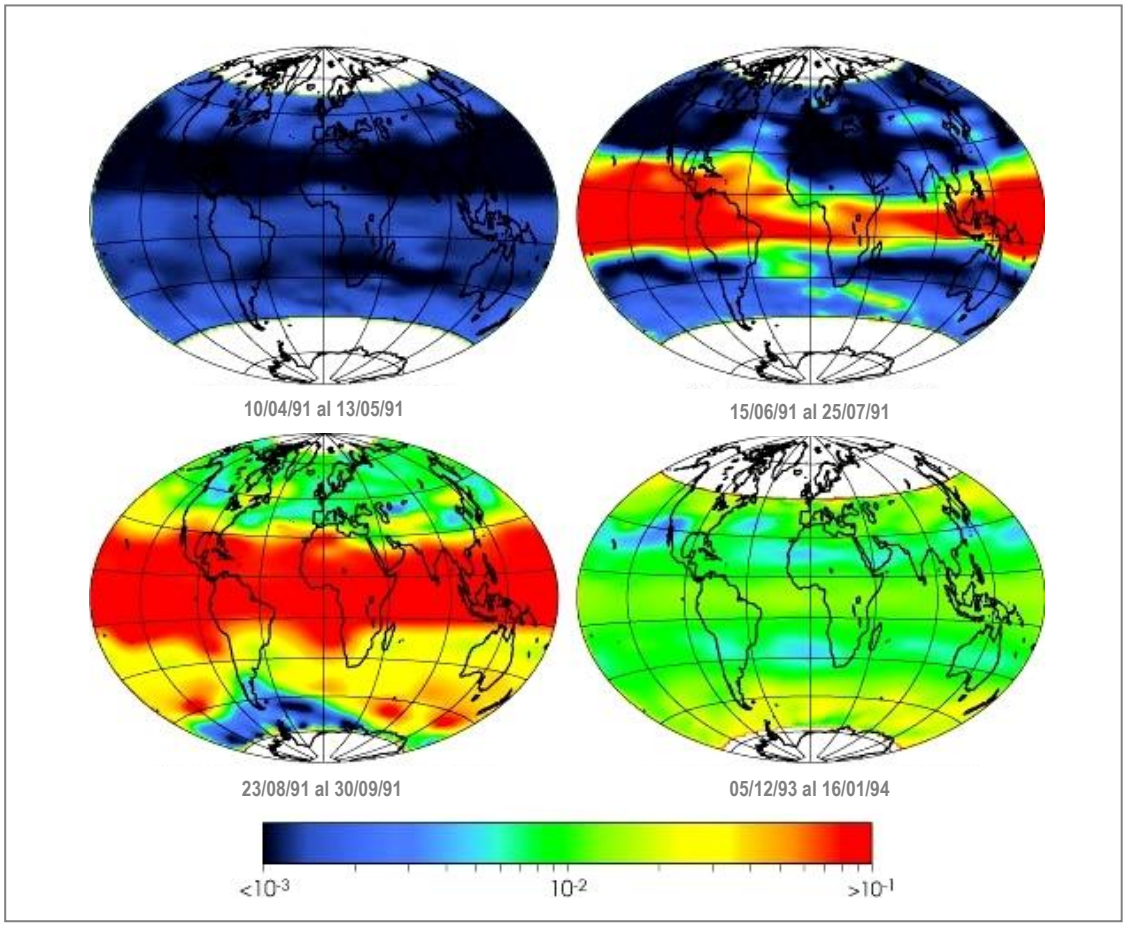
La variación de la concentración de vapor de agua en las horas de sol actúa enérgicamente sobre este efecto invernadero, más que todas las emisiones de anhídrido carbónico que produce la actividad industrial. De hecho el vapor de agua es con mucha diferencia el principal gas de efecto invernadero.

Las plantas del planeta también emiten anhídrido carbónico por la noche; sin embargo, durante el día la fotosíntesis hace que la emisión de oxígeno (al consumir anhídrido carbónico) compense la nocturna y dé vida a nuestro planeta. Las plantas acumulan CO_2 durante su crecimiento en forma de celulosa y azúcares fundamentalmente. Sin embargo cuando mueren y se convierten en biomasa, liberan el carbono que han almacenado. En otras palabras, si la planta no es enterrada rápidamente (procesos sedimentarios), el carbono presente en las

formas orgánicas reducidas (CH_n) se oxidará, retornando a la atmósfera como CO_2, por ejemplo:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

La atmósfera en sentido estricto, es decir, la capa de aire retenida por la fuerza de atracción de la tierra y que toma parte en su rotación, es una mezcla de diferentes gases: 78,09% de nitrógeno, 20,95% de oxígeno, 0,93% de argón, 0,30% de vapor de agua, 350 ppm (0.035%) de CO_2 y trazas de otros gases, sobre todo los denominados nobles y otros procedentes de la contaminación derivada de la actividad industrial y la actividad geológica. Entre estos últimos destaca el SO_2, que es generado tanto por la actividad industrial como por las erupciones volcánicas.

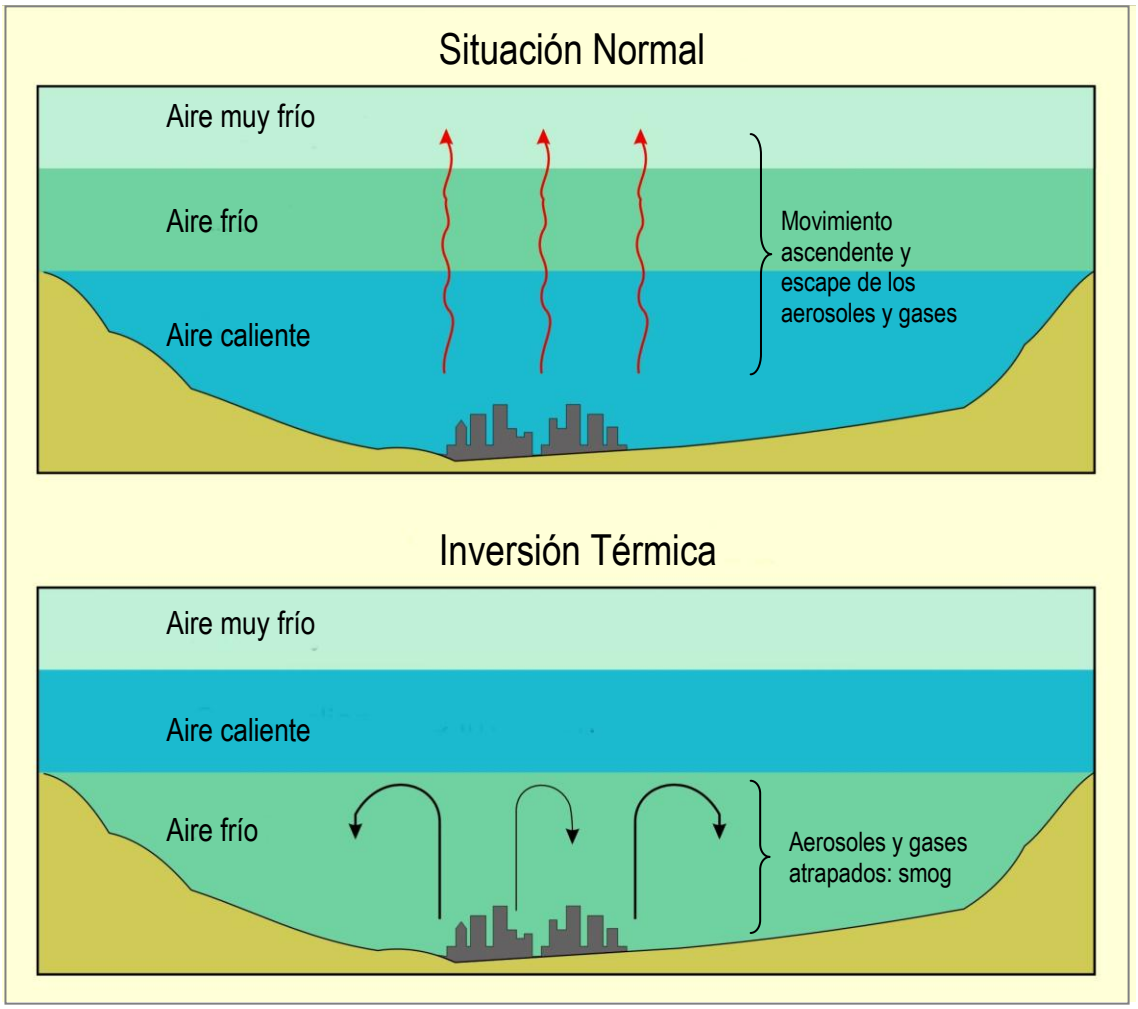


Propagación mundial de los aerosoles del Pinatubo (principalmente gotas de SO_2): SAGE II Mount Pinatubo Eruption Optical Depth Comparison (NASA, 2009). Erupción: Junio de 1991.

El flujo "anual" de azufre oxidado de origen volcánico a la atmósfera podría estar en el orden de 10,4 a 21 millones de toneladas de SO_2, mientras que el de todas las especies sulfuradas podría ser de alrededor de 9 a 46 millones de toneladas, que de alguna manera son comparables a las emisiones de origen antrópico, en el orden de los 76 millones de toneladas por año (Oppenheimer, 2004).

La contaminación atmosférica puede verse además favorecida por dos fenómenos que revisaremos a continuación, la llamada “inversión térmica” y la “isla de calor”:

La *inversión térmica* se presenta cuando en las noches despejadas el suelo ha perdido calor por radiación, y las capas de aire cercanas a él se enfrían más rápidamente que las capas superiores, lo cual genera un gradiente positivo de temperatura con la altitud. Esto constituye un fenómeno contrario al que se presenta normalmente, donde la temperatura disminuye con la altitud. De esta manera la capa de aire caliente queda atrapada entre dos capas de aire frío sin poder circular. La presencia de una capa de aire frío cerca del suelo le da gran estabilidad a la atmósfera porque así prácticamente no se produce convección térmica, ni fenómenos de transporte y difusión de gases. Bajo un punto de vista ambiental este fenómeno es un desastre en regla, ya que toda la contaminación queda atrapada abajo.



Esquema simplificado de una situación de capas normales y otra de inversión térmica.

La inversión térmica se presenta normalmente en las mañanas frías sobre los valles de escasa circulación de aire (p.ej., Santiago de Chile). También se presenta este fenómeno en las cuencas cercanas a las laderas de las montañas en noches

frías (p.ej., Madrid y Santiago de Chile), debido a que el aire frío de las laderas desplaza al aire caliente de la cuenca provocando el gradiente positivo de temperatura. Generalmente, la inversión térmica se finaliza cuando se calienta el suelo y este vuelve a emitir calor, lo que restablece la circulación normal en la atmósfera.

El problema ambiental se presenta cuando se emiten contaminantes al aire en condiciones de inversión térmica, ya que éstos se acumulan abajo. Esto es así debido a que los fenómenos de transporte y difusión ocurren de forma demasiado lenta: la capa de aire frío comprime la capa inferior con los contaminantes contra el suelo. De esta manera la concentración de gases tóxicos puede llegar a alcanzar valores hasta 14 veces por encima de los normales. Condiciones de inversión térmica de larga duración con contaminantes de dióxido de azufre y partículas de hollín causaron la muerte de miles de personas en Londres (1952) y en el Valle de Ruhr (1962).

Causes of the Smog

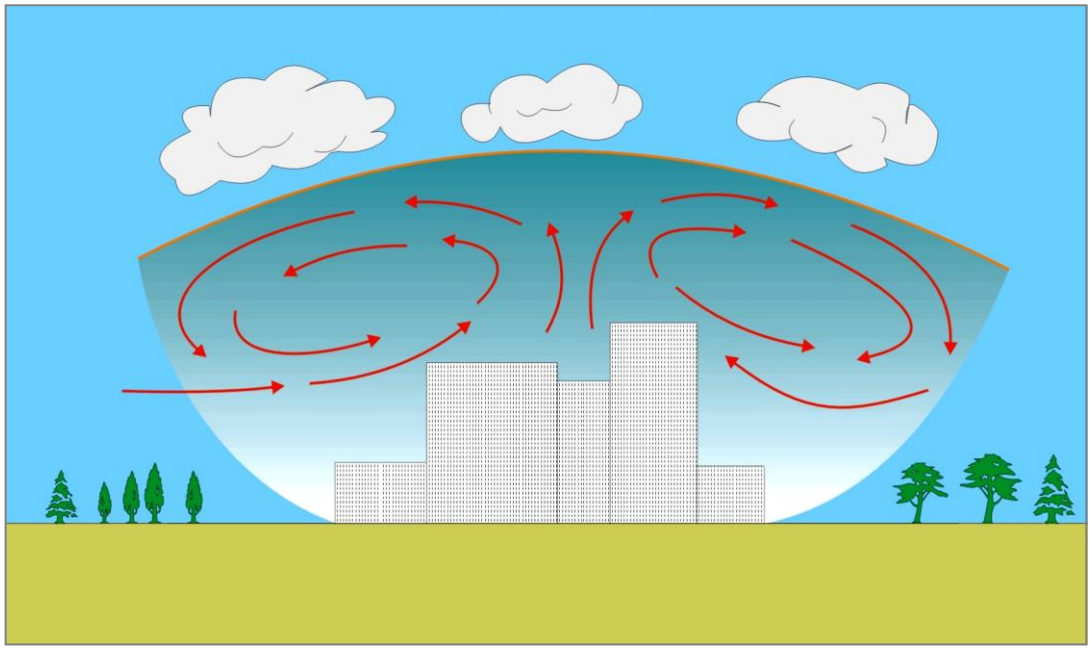
The weather in Greater London had been unusually cold for several weeks leading up to the event. Because of the cold weather, households were burning more coal than usual to keep warm. The smoke from approximately one million coal-fired stoves, in addition to the emissions from local industry, was released into the atmosphere. Increases in smoke and sulfur emissions from the combustion of coal had been occurring since the Industrial Revolution and the British were familiar with these types of smog events. At times, the smoke and emissions were so heavy that residents referred to the events as 'pea soupers' because the fog was as dense as pea soup. However, while the area had experienced heavy smog in the past, no event had caused such problems as the weather event in December, 1952.

De Angelo (2008)



Imágenes de Londres durante los episodios de smog de 1952 (imágenes[11,12]).

La *isla de calor* es específica del ambiente urbano. El pavimento, la ausencia de aire en movimiento, y la gran cantidad de construcciones provocan una concentración de calor superior al registrado en las áreas rurales que rodean la ciudad. A su vez, el calor recibido durante el día es retenido durante la noche durante mas tiempo en el área urbana que en la rural, lo que da origen a un ciclo cerrado de circulación del aire que favorece la concentración de los contaminantes.



Las ciudades generan calor en grandes cantidades. Si la circulación de aire caliente hacia capas superiores se ve impedida de alguna forma, los contaminantes permanecerán retenidos y su concentración crecerá progresivamente.

El efecto final, en ambos casos (inversión térmica e isla de calor), es la concentración de contaminantes en las ciudades, efecto especialmente notable sobre las de mayores dimensiones, con importante actividad industrial, y rodeadas de áreas montañosas, por ejemplo, Santiago de Chile.



Inversión térmica y montañas, una mala combinación. Santiago de Chile (imagen[13]).

3.1.4 Atmósfera, contaminantes y salud humana

Aunque pueda parecer obvio, el aspecto más importante de la atmósfera es que es vital para la respiración de los seres vivos. Como consecuencia de esta situación, una baja calidad del aire, es decir, que su composición se aparte de determinados estándares, puede provocar enfermedades o incluso la muerte como ocurrió en Londres en los episodios de smog de 1952. Ahora bien, la pregunta importante es

¿cuáles son los factores primordiales que pueden afectar a la salud? A continuación revisaremos algunos de los aspectos más relevantes de este tema.

<u>*Gases*</u>, la dispersión de gases distintos a los habituales en la atmósfera es un factor importante a considerar. Estos gases contaminantes pueden ser de dos tipos, "primarios", es decir, que se emiten de esa forma a la atmósfera, y "secundarios", que se forman a partir de reacciones que implican a los primarios. Los más importantes, sus orígenes y efectos son:

CO_2: El dióxido de carbono es un gas común en la atmósfera, pero su excesiva abundancia puede ser letal ya que bloquea las funciones respiratorias, induciendo la muerte por asfixia. Esto último puede producirse localmente por acumulación de CO_2 en lugares cerrados, sobre todo si hay algún foco local de combustión. También la actividad volcánica produce la emisión de enormes volúmenes de este gas, en forma de emanaciones que pueden llegar a ser letales, tal como ocurrió en el desgraciado incidente del Lago Nyos en Camerún (ver caja). Otro efecto importante de este gas es el temido "efecto invernadero", debido a su acumulación en la atmósfera a gran escala. Con respecto a su origen antrópico, se emite como consecuencia de todos los procesos que implican combustión. A gran escala en la obtención de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, y en los vehículos de transporte. En el ámbito minero, afecta tanto a las explotaciones de carbón, como a la utilización de maquinaria pesada con gran consumo de combustibles derivados del petróleo, principalmente diesel en este caso.

*Although a sudden outgassing of CO_2 had occurred at Lake Monoun in 1984, killing 37 local residents, a similar threat from **Lake Nyos** was not anticipated. However, on August 21, 1986, a limnic eruption occurred at Lake Nyos which triggered the sudden release of about 1.6 million tonnes of CO_2; this cloud rose at nearly 100 kilometres per hour (62 mph). The gas spilled over the northern lip of the lake into a valley running roughly east-west from Cha to Subum, and then rushed down two valleys branching off it to the north, displacing all the air and suffocating some 1,700 people within 25 kilometres (16 mi) of the lake, mostly rural villagers, as well as 3,500 livestock.*

Wikipedia (2011a)



El Lago Nyos en Camerún y ganado muerto por la salida repentina de CO_2 acumulado en los sedimentos profundos del lago (imágenes[14,15]).

CO: El monóxido de carbono es un gas muy poco común en la atmósfera natural y se forma como consecuencia de combustiones incompletas en atmósferas cerradas empobrecidas en oxígeno. Es mucho más letal que el dióxido de carbono. Una concentración de 0,25-0,50% de CO en aire deja sentir sus efectos tóxicos.

SO_x: Reciben esta denominación genérica los distintos compuestos resultado de la combustión de compuestos sulfurados, tales como el dióxido (SO_2) y trióxido de azufre (SO_3). Son comunes como producto de la combustión de carbones (con pirita) y de la pirometalurgia de sulfuros. Su principal problema es que reaccionan con el agua, incluso con el vapor de agua atmosférico, para dar origen a ácido sulfúrico. La llamada lluvia ácida es el más notable de los fenómenos asociados a este proceso. La otra fuente importante de óxidos de azufre es la actividad volcánica. El dióxido de azufre se oxida para formar trióxido de azufre: $2SO_{2\,(g)} + O_{2\,(g)} \rightarrow 2SO_{3\,(g)}$. A su vez el trióxido de azufre reacciona con el agua atmosférica para formar ácido sulfúrico: $SO_{3\,(g)} + H_2O_{\,(l)} \rightarrow H_2SO_{4\,(l)}$.



A la izquierda, la fundición de cobre de Chuquicamata (Chile) ca. 1985, cuando aun no existían medidas de captación de SO_2. A la derecha, pluma "aplastada" ("niebla" blanca que se extiende hacia la derecha: flecha) resultante de las emisiones de las chimeneas de Chuquicamata (posición aproximada marcada con un círculo) en 2006.

A su vez la lluvia ácida tiene nefastos efectos sobre (Oyarzún y Oyarzun, 2011):

- Edificios y monumentos, con daños a estos, revestimientos de caliza y estatuas de mármol: $CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2$, además corroe paulatinamente las estructuras metálicas.
- Los bosques, donde arrastra minerales importantes de las hojas y el suelo. También bloquea los poros pequeños en la superficie de las hojas. Con un mal funcionamiento de las hojas, el crecimiento de los árboles se retrasa. Esto se traduce en una pérdida de hojas, crecimiento retardado y corteza dañada. Los árboles son así más propensos a los ataques de hongos e insectos. .
- El suelo, donde los metales pesados que puedan estar incorporados a la matriz orgánica o inorgánica son puestos en solución y quedan así "disponibles" en estado iónico. Las plantas pueden absorber entonces estos

metales con mayor facilidad, dañando la flora, y por supuesto, a quienes las consumen, incluyendo a las personas.

- Los cuerpos de agua, hacia donde llegan arrastrados desde los suelos elementos nocivos como el aluminio, el plomo o el mercurio, lo que resulta en la contaminación del agua. Aparte de esto, las aguas se acidifican con el consiguiente daño a la vida acuática.

NO_x: Al igual que los anteriores, se trata de distintos compuestos de nitrógeno originados durante procesos de combustión. Su presencia en la atmósfera representa un problema porque favorece la formación de otros importantes contaminantes, como el ozono o los aldehídos, aparte de ser otro gas causante de la lluvia ácida a través de la formación de ácido nítrico (HNO_3).

O_3: El oxígeno triatómico u ozono se forma en la atmósfera como consecuencia de diversos procesos, bajo la acción de la energía fotoeléctrica:

$$O_2 + h\nu \longrightarrow O + O$$
$$O + O_2 \longrightarrow O_3$$

Donde hv = energía fotoeléctrica

El ozono es un poco la historia de *Dr. Jekyll* y *Mr. Hyde*. Cuando se forma en la estratosfera (capa de ozono) juega un papel de escudo, absorbiendo una parte decisiva de la radiación ultravioleta de alta frecuencia; por su parte, el ozono troposférico se crea cerca de la superficie de la Tierra por acción de los rayos ultravioleta. Este ozono puede dañar la función pulmonar e irritar el sistema respiratorio.

… The highest levels of ozone in the atmosphere are in the stratosphere, in a region also known as the ***ozone layer*** *between about 10 km and 50 km above the surface (or between about 6 and 31 miles). Here it filters out photons with shorter wavelengths (less than 320 nm) of ultraviolet light, also called UV rays, (270 to 400 nm) from the Sun that would be harmful to most forms of life in large doses. These same wavelengths are also among those responsible for the production of vitamin D in humans.*

Low level ozone (or tropospheric ozone) is an atmospheric pollutant. It is not emitted directly by car engines or by industrial operations, but formed by the reaction of sunlight on air containing hydrocarbons and nitrogen oxides that react to form ozone directly at the source of the pollution or many kilometers down wind. Ozone reacts directly with some hydrocarbons such as aldehydes and thus begins their removal from the air, but the products are themselves key components of smog. Ozone photolysis by UV light leads to production of the hydroxyl radical OH and this plays a part in the removal of hydrocarbons from the air, but is also the first step in the creation of components of smog such as peroxyacyl nitrates which can be powerful eye irritants. The atmospheric lifetime of tropospheric ozone is about 22 days; its main removal mechanisms are being deposited to the ground, the above mentioned reaction giving OH, and by reactions with OH and the peroxy radical HO_2 …

Wikipedia (2011b)

Polvo en suspensión (particulado aéreo):
Las partículas que llegan a la atmósfera constituyen lo que denominamos vulgarmente polvo en suspensión. Su efecto principal es el oscurecimiento de la atmósfera, pero tiene o puede tener, en función de distintos parámetros, efectos notables sobre la salud de los que lo inhalan.

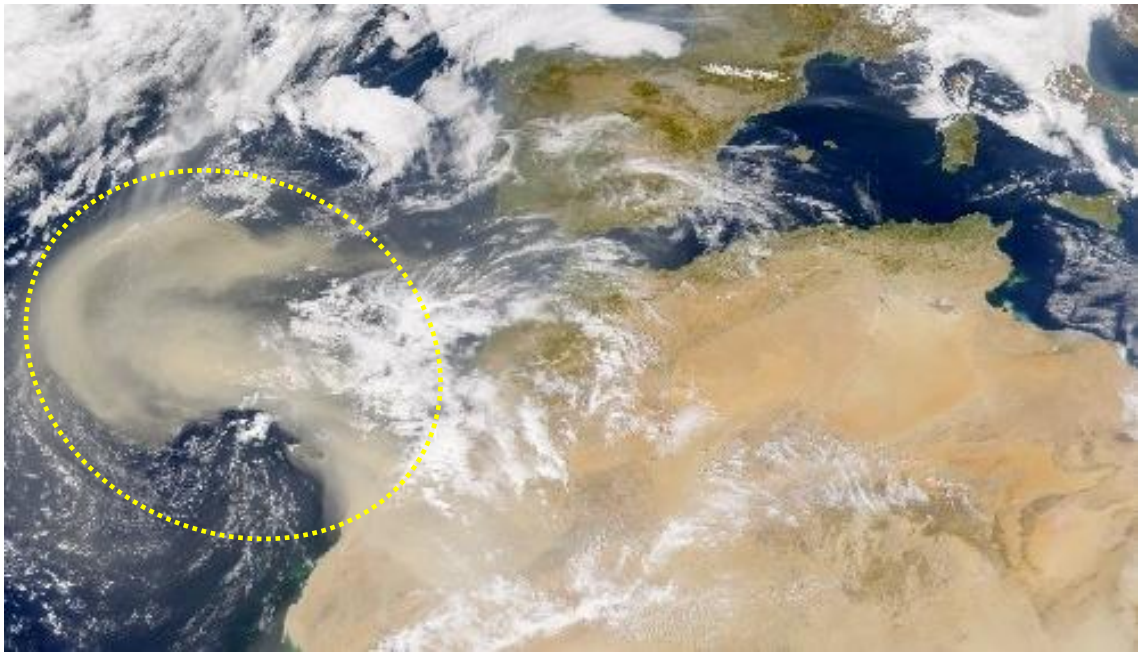
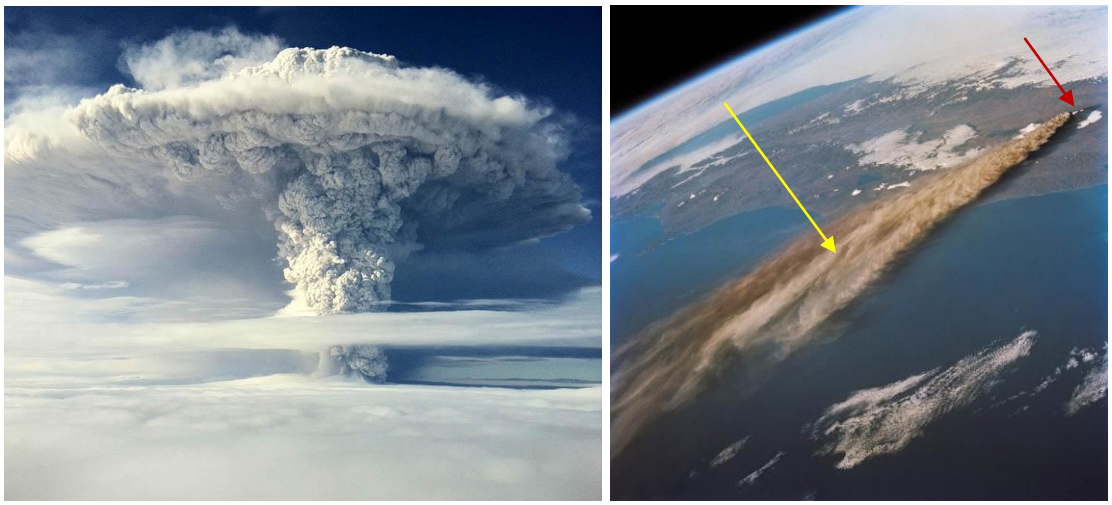


Imagen de la NASA para una tormenta de polvo que nace en el Sáhara y se desplaza hacia el Atlántico, ver óvalo (imagen[16]).

Hay dos cuestiones especialmente relevantes en este sentido, la granulometría de las partículas y su composición. En lo que se refiere a la granulometría, las partículas de polvo pueden tener tamaños muy variables en función de la energía que las sustenta. Esta energía puede ser un fuerte viento, la fuerza de una erupción volcánica, o una voladura de rocas. En cualquier caso, las partículas de tamaños menores se mantienen sistemáticamente durante periodos de tiempo más largos que las mayores. Digamos así que las partículas pequeñas tienen un mayor "tiempo de residencia" en la atmósfera, aunque todas tienden a sedimentarse en cuanto la energía de sustentación disminuye lo suficiente o cesa.

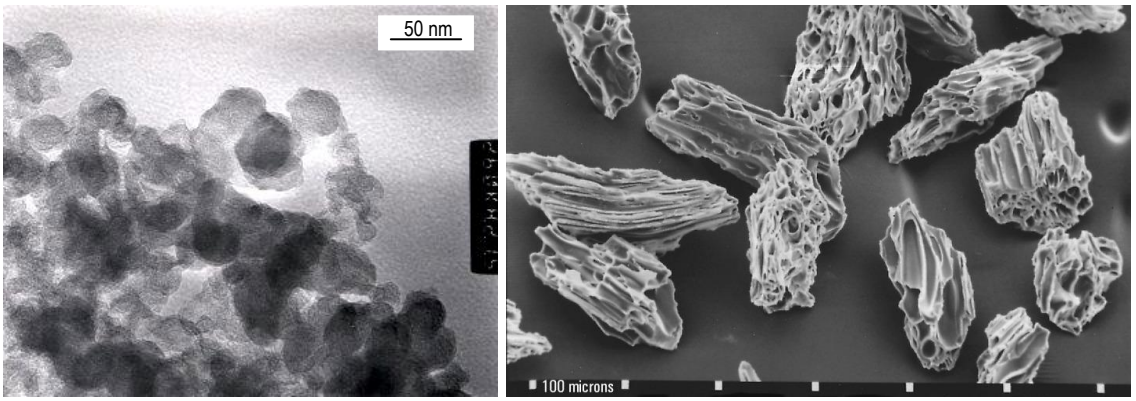


Introducción de ceniza y gases a las capas altas de la atmósfera por la actividad volcánica. A la izquierda el volcán Puyehue (Chile) en 2011; a la derecha, el volcán Kliuchevskoi (Rusia) en 1994 (imágenes[17]). La flecha roja marca la posición del volcán, la amarilla muestra la pluma desplazada por el viento.

Moreno (2007) indica que el tamaño del particulado aéreo puede variar en hasta cuatro órdenes de magnitud, estando la fracción más fina dominada por compuestos carbonosos, y la más gruesa por silicatos y sal marina. El material particulado (PM) de mayor tamaño entra en la atmósfera directamente mediante mecanismos de resuspensión desde la superficie terrestre o marina y se le define por tanto como "primario". Por el contrario, la mayoría del PM más fino forma núcleos en la atmósfera a partir de reacciones que involucran gases precursores. El particulado se puede dividir en categorías de acuerdo a su tamaño, así tenemos los PM_{10} que fluctúan entre 2,5 y 10 μm y los $PM_{2.5}$, que son menores a 2,5 μm. El PM_{10} corresponde a pequeñas partículas sólidas formadas mayoritariamente por compuestos inorgánicos tales como silicatos, otras fases minerales, y material orgánico asociado a partículas de carbono (→ hollín). Debido a su pequeño tamaño el $PM_{2.5}$ presenta los mayores tiempos de residencia en la atmósfera.

*Según su tamaño, las partículas se depositan cerca o a cierta distancia de la fuente de emisión. Si son muy pequeñas pueden mantenerse suspendidas y ser transportadas a grandes distancias. Dentro de las partículas suspendidas se denomina "respirables" a las de un diámetro menor o igual a 10 μm (**PM_{10}**) por su capacidad de introducirse en las vías respiratorias. Cuanto más pequeñas son las partículas mayor es su capacidad de penetración en el árbol respiratorio. Las partículas finas cuyo diámetro aerodinámico es ≤ 2,5 μm alcanzan fácilmente los bronquíolos terminales y los alvéolos, desde donde pueden ser fagocitadas por los macrófagos alveolares y atravesar la barrera alvéolo-capilar para ser transportadas hacia otros órganos por la circulación sanguínea. Más recientemente se han descrito las partículas "ultrafinas" cuyo diámetro es aún menor (≤ 0,1 μm) y pueden pasar directamente desde los alvéolos al torrente circulatorio. Las partículas pueden contener compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos y/o inorgánicos como sales y metales.*

Oyarzún (2010)



Imágenes de particulado aéreo. A la izquierda imagen TEM de partículas de diesel; a la derecha, imagen SEM de ceniza volcánica (material silicatado), con partículas de unos 100 μm de longitud (imágenes[18,19]).

Dentro del material particulado debemos resaltar la presencia de hidrocarburos y sales. Los hidrocarburos (fase gas y partículas) se forman por la combustión incompleta de gasolinas y otros combustibles, y algunos tienen demostrados efectos cancerígenos, como el benceno o butadieno. A estos debemos agregar los aldehídos, que son contaminantes secundarios, originados a partir de los hidrocarburos formados en la combustión de gasolinas. Son moléculas irritantes,

especialmente para los ojos. Por su parte la presencia de sales en la atmósfera está ligada a la presencia de abundante agua, en forma de aerosoles. Las más comunes son las sales de origen marino, en el aire cargado de gotitas de agua relacionado con la acción del oleaje. A destacar los cloruros, donde la mayoría tienen la composición de la halita (NaCl). Se producen a partir de la rotura de burbujas al llegar a la superficie del océano. Estos aerosoles presentan niveles predeciblemente bajos en el interior de la península Ibérica (1 μg m^{-3}), pero registran valores de al menos el doble en las localidades costeras, excediendo los 10 μg m^{-3} en las Islas Canarias (Moreno, 2007).

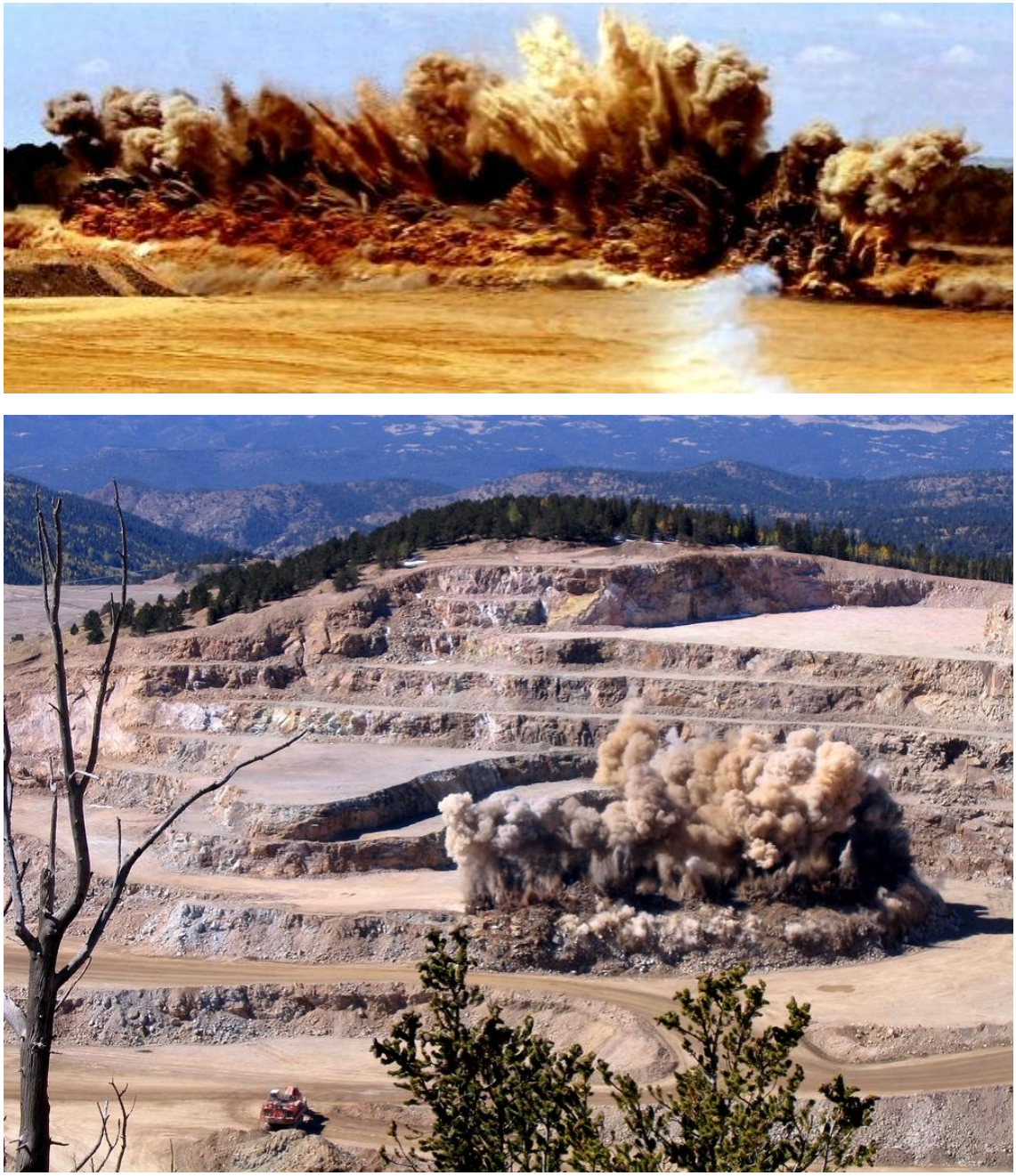
3.1.5 Minería y atmósfera: una difícil pero (casi) insustituible relación

La minería produce una serie de emisiones a la atmósfera en diferentes formas:

1. Sólidas, que incluyen el polvo de las voladuras de roca, el de carga y transporte, y el polvo que levanta el viento de las balsas (*relaves*) no controlados en regiones áridas o semiáridas. Finalmente tenemos el polvo emitido por las fundiciones como particulado aéreo que emerge de las chimeneas de las grandes fundiciones.
2. Gases, que incluyen los derivados de los procesos pirometalúrgicos de fundición de sulfuros así como de la quema de combustibles (tráfico rodado, generación de electricidad, etc.). A su vez la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo) se relaciona directamente con la llamada “huella de carbono” de la industria minera, esto es, la cantidad de gases de invernadero que se producen por unidad o unidad de masa del producto generado.
3. También deberíamos agregar a esta lista, aunque no sean emisiones propiamente tales, los ruidos derivados del proceso minero, especialmente la onda de choque que se genera durante una gran voladura de roca en una mina a cielo abierto.

Emisiones sólidas El polvo de las voladuras de roca se emite sea o no la mina a cielo abierto. En el caso de las minas subterráneas se emitirá a la atmósfera a partir de uno o varios puntos definidos, esto es, las chimeneas de ventilación y los pozos de circulación de aire. Si procede de explotaciones a cielo abierto, provendrá de un frente de explotación más o menos extenso (decenas de metros de longitud). En cualquier caso, es prácticamente imposible evitar su emisión, puesto que afectará, por principio básico a roca seca, sin posibilidad de un humedecimiento rápido que evite la dispersión. Solo en la minería subterránea podría evitarse su salida, mediante filtros en los puntos de salida. Desafortunadamente tales filtros tienden a ser evitados para favorecer la rapidez de la limpieza del polvo generado en el interior de la mina durante la voladura. La

composición de este polvo será la misma que la de la roca volada, con lo que a menudo se tratará de roca con componentes minerales "problemáticos", conteniendo minerales oxidables con metales pesados.



Voladuras en minería a cielo abierto. Arriba, remoción (striping) de sobrecarga en Sudáfrica; abajo voladura de un banco en Fairview (Colorado) (imágenes[20,21]).

El proceso de carga de camiones también es generador de abundante polvo, aunque en este caso puede ser más fácil su retención, mediante el regado de las rutas de carga durante el proceso. La composición del polvo es la misma que en el caso anterior, es decir, la correspondiente a la de la mineralización y/o su roca encajante. Por otra parte tenemos el polvo generado durante el proceso de transporte, en su doble vertiente de polvo que pueda escaparse del elemento de

transporte (camión o cinta transportadora) y polvo levantado por el medio de transporte (solo en el caso de los camiones). En el caso de los camiones, se produce una mezcla entre partículas procedentes del yacimiento y las procedentes de la pista, aunque en ambos casos es relativamente fácil evitar parcialmente el problema regando la pista de rodadura. En el caso de las cintas, hay que trabajar también con material humedecido, o recurrir a instalaciones de mayor coste, cerradas para evitar los escapes de polvo.



Acumulación de polvo en la explotación a cielo abierto de Radomiro Tomic (RT), en el Distrito Minero de Chuquicamata (Chile). La maquinaria minera es apenas visible.



Mina Sur (Distrito Minero de Chuquicamata). A la izquierda carga de un camión; a la derecha, abundante polvo en la mina provocado por un pequeño movimiento de tierra.

Otra fuente importante de polvo en regiones áridas o semiáridas del mundo son las balsas de estériles (*relaves*).

> ***Spray, Seal, Prevent Fugitive Dust***
>
> *Winter freezes and dry summer months can both cause serious mine tailings management issues relating to an ever-more stringent environmental regulatory environment and health risks. In winter, mine tailings can freeze dry, resulting in fugitive PM_{10} and $PM_{2.5}$ dust and toxic coal ash escaping from the surface. In non-freezing conditions, storm-water pollution can contain hazardous content.*
>
> *Sealing mine tailings is the only practical way of preventing fines from lifting into the air, creating dust, and entering storm-water runoff. It is also the only way to eliminate the threat of respiratory illness and toxic levels of metal and other poisons in workers and children at or near tailings sites worldwide.*
>
> *MIDWEST (2011)*

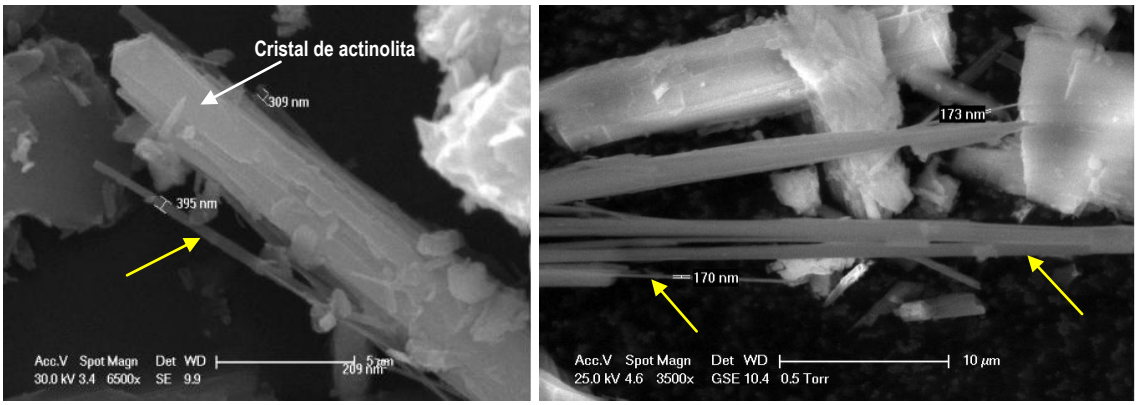
Un caso particularmente complejo puede ser el de las balsas que contienen partículas asbestiformes. Cuando las fibras de asbesto entran en el aire estas pueden ser inhaladas y pasar a los pulmones, donde pueden causar graves problemas de salud. Estos incluyen la fibrosis pulmonar progresiva (asbestosis), enfermedad pleural (derrame pleural y placas), y enfermedades malignas como el carcinoma broncogénico y el mesotelioma maligno.



La Higuera, Chile. A la izquierda, el pueblo y en primer plano, una balsa abandonada expuesta al viento; a la derecha, materiales de la balsa y el policlínico local (Oyarzun et al., 2010).

El término asbesto se aplica a un grupo de silicatos fibrosos, que incluye aquellos que pertenecen al grupo de la serpentina (crisotilo) y al de los anfíboles. Sin embargo, sólo las variedades llamadas "asbestiformes" de los anfíboles como la grunerita (amosita) o la riebeckita (crocidolita), pueden ser consideradas como asbestos en un sentido estricto. Esto implica que las variedades "no asbestiformes" de estos minerales, pero que sin embargo generan fragmentos aciculares, "no pueden" ser consideradas como asbestos propiamente tales. Esto parece tener más connotaciones semánticas que prácticas, ya que como han mostrado Oyarzun et al. (2010) los materiales de balsa (unas 20.000 toneladas) abandonados en un pequeño pueblo del Norte de Chile llamado La Higuera pueden ser la clave para explicar ciertos problemas graves de salud en la población, incluyendo un caso de mesotelioma. La clave para entender el problema de acuerdo a esos autores radicaría en la mineralogía de ganga de las explotaciones mineras de cobre aledañas al pueblo. Recordemos que antes de la flotación para la concentración de sulfuros de cobre, el mineral debe ser triturado a un tamaño muy fino. En el caso de yacimientos de cobre de La Higuera, la ganga (minerales sin interés económico)

incluye un anfíbol llamado actinolita, típico de las mineralizaciones de hierro y hierro-cobre del Norte de Chile. La trituración progresiva de un anfíbol como la actinolita llevará no tan solo a disminución del tamaño de grano, sino que el mineral formará fragmentos aciculares (con forma de aguja) cada vez más pequeños y delgados.



Imágenes SEM de cristales de actinolita de la balsa de La Higuera (Oyarzun et al., 2010), mostrando fragmentación progresiva (izquierda) en fragmentos aciculares (flechas amarillas); a la derecha se puede apreciar la existencia de acículas de un grosor tan pequeño como 170 nm.

Algunas de las partículas que se muestran en la imagen superior cumplen estrictamente con los requisitos para ser consideradas como asbestos, esto es, son más largas que 5 µm y su razón largo-ancho es mayor que 3:1. Esta definición y la metodología de identificación PCM (*phase contrast microscopy*) son cuestionadas por Gamble y Gibbs (2008), quienes no consideran como "asbestos" los fragmentos de exfoliación de anfíboles. Al respecto, y haciendo uso de un poco de sentido común, debemos tener en mente de que no se trata de una discusión "técnico-legal" sobre a que (o a que no) llamamos asbesto (que tanto gustaría a muchos), sino si las partículas son o no peligrosas para el ser humano. Como muestran Oyarzun et al. (2010) para el pueblo de La Higuera, estas partículas lo son. En este sentido puede ser útil recordar un dicho inglés que viene a decir que *si algo tiene cuatro patas y no es una silla debe ser un animal*. De la misma manera, *si los fragmentos de anfíbol pueden causar mesotelioma, entonces deben ser considerados como asbestos*.

Pero el problema de las balsas y el polvo de estas que es movido por el viento no solo se relaciona con los asbestos. Recordemos que las balsas contienen pirita y otros sulfuros (aparte de los minerales de la roca encajante). En este sentido resulta preocupante como en algunos lugares se pueden encontrar balsas abandonadas incluso dentro o en las afueras de los pueblos. Mencionaremos aquí dos llamativos casos, uno en Chile y otro en España. El primero afecta al pueblo de Andacollo, en la Región de Coquimbo; el segundo al pueblo de Mazarrón, en la Comunidad Autónoma de Murcia. En ambos casos hablamos de un clima semiárido, propicio para que el polvo mineral se disperse con relativa facilidad en el entorno.



Andacollo (Chile), vista general de la gran balsa (imagen[22]) y fotografía de detalle a lo largo de una de las calles del pueblo.



Balsas abandonadas en Mazarrón (flechas amarillas), el pueblo se localiza atrás (hacia la derecha) de las explotaciones (flecha roja).

> *… PM and SO_2 are the principal air contaminants emitted from primary copper smelters. Actual emissions from a particular smelter will depend upon the smelting configuration (type and mix of equipment used), control devices applied, and the operating and maintenance practices employed. Typically, arsenic will be emitted as PM. In addition, actual arsenic emissions will vary depending on the quantity of arsenic introduced to the smelter as copper-bearing feed materials …*
>
> *US EPA (1998)*

Nos centraremos a continuación en un problema muy grave que tiene que ver con las emisiones de "particulado aéreo" desde las grandes fundiciones de minerales sulfurados. Como señalan Oyarzún y Oyarzun (2011) el material que entra en una fundición de cobre no es "monomineral", y así junto con sulfuros de escasa toxicidad como podrían ser la calcosina (Cu_2S) o calcopirita ($CuFeS_2$), hay otros que entran en el sistema y que contienen metaloides como el arsénico. Es el caso de la enargita (Cu_3AsS_4) o la tennantita: $((Cu,Fe)_{12}As_4S_{13})$. Por otra parte, están las minas donde se extraen minerales polimetálicos, con galena (PbS), esfalerita (ZnS) y calcopirita (más otros sulfuros de cobre). En este último caso podemos esperar particulado aéreo rico en plomo (asociado a la fundición de la galena) y cadmio (asociado a la esfalerita). Nos centraremos aquí en el arsénico por su peligrosidad ambiental incuestionable. En mayor o menor grado, dependiendo del mineral de mina, casi todas las fundiciones de cobre se enfrentan a un problema común: el arsénico. El proceso de fundición genera especies de arsénico solubles que deben ser removidas en la fase de

generación de ácido sulfúrico (Dalewski, 1999). En el sistema de gases a alta temperatura (600–800°C) la especie trivalente de arsénico se encuentra como As_4O_6. Durante el enfriamiento final, el arsénico empezará a precipitar a unos 200ºC y el proceso se completará a 40-80ºC.

Children living near a copper smelter in Tacoma, Washington, were shown to have increased levels of arsenic in hair and urine. The urinary arsenic level decreased with distance of residence from the smelter stack. House vacuum-cleaner dust showed a similar distance relationship. Urine arsenic levels in children varied synchronously over a 5-wk period, indicating that inhalation was the most likely exposure route. In children urinary arsenic level showed an inverse relationship to age with younger children showing consistently higher urine arsenic levels.

A death-record analysis indicated an increased respiratory cancer incidence in men working at this smelter. Since published urinary arsenic levels for men working at this smelter were similar to those seen in people residing near the smelter, it was felt that the community surrounding the smelter might be exposed to an increased respiratory cancer risk. Accordingly, action was taken to reduce arsenic emissions from the smelter.

Milham y Strong (1974)

El arsénico en el aire (US EPA, 1998) existe principalmente en forma de partículas (en su mayoría en partículas inferiores a 2 µm de diámetro → $PM_{2.5}$) y es por lo general una mezcla de arsenito y arsenato. Estas partículas pueden ser transportadas por el viento y las corrientes de aire hasta que son llevadas de vuelta a la tierra por deposición húmeda o seca. El tiempo de residencia de arsénico unido a partículas depende del tamaño de partícula y las condiciones meteorológicas, sin embargo, un valor típico es de aproximadamente 9 días. Como es de esperar, los niveles de arsénico en el aire varían con la distancia a la fuente y la velocidad del viento.

<u>*Emisiones gaseosas*</u> Las emisiones mineras de gases a la atmósfera pueden ser de varios tipos:

- Gases de combustión de la maquinaria implicada en el proceso minero. Son los gases habituales ligados a la combustión de hidrocarburos, gasolinas, diesel, pero que al implicar a maquinaria pesada suelen ser de gran volumen.



Camión de gran tonelaje en Mina Sur Distrito Minero de Chuquicamata.

- Gases liberados durante el proceso de extracción. Los más comunes son los que se liberan en la explotación del carbón, principalmente CO_2, CO y el famoso grisú, una mezcla altamente explosiva de metano (CH_4) y aire. De cualquier manera, el principal problema se deriva de los incendios en minas de carbón. Estos incendios son comunes y las estadísticas de la Mine Safety and Health Administration (MSHA) de los Estados Unidos indican que entre 1990 y 1999 se produjeron 153 incendios de notificación obligatoria (NIOSH, 2000). El problema con estos fuegos radica en que algunos pueden tardar meses si no años en extinguirse y sus repercusiones se dejan notar sensiblemente en superficie.

> *It's no secret that greenhouses gases like carbon dioxide are linked to rising temperatures around the planet. What is less well known is that coalmine fires account for a significant contribution to annual carbon dioxide emissions around the world. These fires are difficult to contain and even more difficult to extinguish, but as they are the best approach to limiting greenhouse gas emissions without effecting an already fragile global economy. In addition to reducing greenhouse gases, extinguishing coalmine fires will also preserve non-renewable resources which are burning unchecked in the wild.*
>
> *The Ravenwood Organization (2011)*



Incendio de una mina de carbón (imagen[23]).

- Gases implicados en las voladuras. Son consecuencia de la deflagración del explosivo, aunque en principio su volumen no suele ser tan importante como para producir efectos de consideración. Al contrario de lo que ocurre en minería subterránea, en superficie las explosiones se producen en ambiente abierto y los gases derivados de la explosión se disipan rápidamente en la atmósfera. Sin embargo, como señalan Eltschlager et al. (2004), si la voladura de roca se realiza cerca de una zona residencial, para minimizar el riesgo de la dispersión de fragmentos de roca el diseño de la voladura se hace más restrictivo en el espacio. El resultado es que parte de los gases quedan atrapados y en su escape seguirán el camino de menor resistencia. En ocasiones, los gases migran a residencias cercanas y pueden provocar enfermedades entre los moradores. Al respecto, la detonación de un explosivo típico como ANFO (*Amonium Nitrate — Fuel Oil*) no debería generar gases peligrosos: $3NH_4NO_3 + CH_2 \rightarrow 7H_20 + CO_2 + 3N_2$, sin embargo, se generarán gases tóxicos si la proporción de *fuel oil* es incorrecta, se introduce agua en el explosivo, o la velocidad óptima de

detonación no se consigue. En esos casos se pueden formar gases peligrosos como CO y NO_x (Eltschlager et al., 2004).



ANFO peletizado (imagen[24]).

- Gases implicados en procesos directamente relacionados con la actividad metalúrgica. Los metales de base tales como Cu, Pb o Zn se encuentran en la naturaleza (de manera principal) como sulfuros. El procedimiento estándar para la extracción de estos metales pasa por la molienda de la roca mineralizada, flotación-concentración y fundición (pirometalurgia) de esos materiales. Es en este último proceso donde surgen algunos de los principales problemas ambientales ligados a la actividad minera. Las operaciones pirometalúrgicas de fundición-conversión producen gases indeseados debido a la serie de reacciones que ocurren durante el proceso. Cuando a la mezcla de sulfuro fundido se le introduce aire, una parte se oxida rápidamente a óxido metal (una reacción exotérmica) (1) y este producto inicial reacciona a su vez con el resto del sulfuro para formar metal elemental (M) (reacción endotérmica) (2). En la reacción exotérmica global el sulfuro de metal se convierte en metal elemental y SO_2 (3). Este hecho es importante desde el punto de vista de la eficiencia energética del proceso, ya que la reacción total tiene carácter exotérmico, es decir, libera energía (Habashi, 1994) (M: metal):

  (1) $2MS + 3O_2 \rightarrow 2MO + 2SO_2$ (exotérmica)

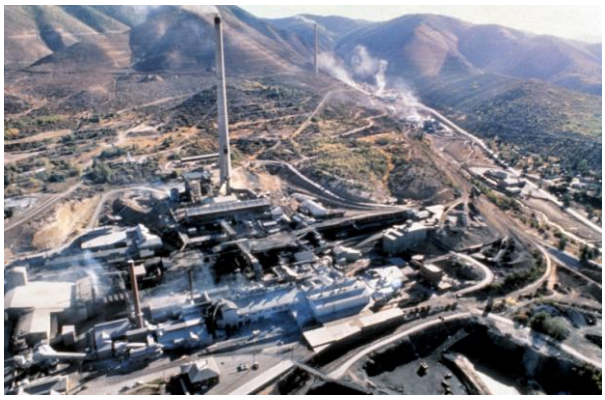
  (2) $2MO + MS \rightarrow 3M + SO_2$ (endotérmica)

  (3) $MS + O_2 + M + SO_2$ (reacción total → exotérmica)

  Aunque se ha progresado mucho en las técnicas de remediación de estos problemas, las chimeneas de las plantas de fundición aun continúan emitiendo (aunque menos) gases como el dióxido de azufre que luego será el precursor del fenómeno ya descrito de la lluvia ácida. El dióxido de azufre reaccionará con el agua de las nubes de la siguiente manera:

1. Primero el dióxido de azufre se oxida para formar trióxido de azufre: $2SO_{2\,(g)} + O_{2\,(g)} \rightarrow 2SO_{3\,(g)}$.
2. A su vez el trióxido de azufre reacciona con el agua atmosférica para formar ácido sulfúrico: $SO_{3\,(g)} + H_2O_{\,(l)} \rightarrow H_2SO_{4\,(l)}$

En otro terreno debemos recordar también las emisiones de arsénico desde las fundiciones al exterior. Al respecto de estos problemas potenciales y no "tan" potenciales, existen dos tristes ejemplos (Oyarzún y Oyarzun, 2011). El primero tiene que ver con la fundición de Bunker Hill, Idaho (Distrito Coeur d'Alene). En 1973 el sistema de filtros de su chimenea dejó de funcionar durante un período de gran bonanza de precios. Los ejecutivos de la empresa prefirieron continuar las operaciones contaminando gravemente la atmósfera con plomo y causando un fuerte daño neurológico a la población, en particular a los niños, más susceptibles a este tóxico. Según se señaló posteriormente, un cálculo económico había mostrado que las ganancias permitirían pagar fácilmente las posibles multas ambientales.



La fundición de Bunker Hill (ca. 1984), en el Distrito Minero de Coeur d'Alene (imagen[25]).

El segundo hace referencia a la Fundición de Ventanas y el pueblo de Quinteros en Chile. Esta fundición es actualmente propiedad de CODELCO, y se localiza en lo que antes fue el hermoso balneario de Quinteros, situado junto a un valle fértil de la zona central del país. Tanto el balneario como el valle están arruinados como tales y la contaminación (agravada por la instalación de termoeléctricas) afecta gravemente la salud de la población, expuesta a altos niveles de arsénico y otros contaminantes. Todos los intentos por revertir la contaminación, que se iniciaron en 1992, han fallado y por el contrario en Abril de 2011 se alcanzaron niveles insostenibles de contaminación. Al respecto, el periodista Gustavo Lagos (2011) señalaba el 6 de Abril que la justicia había ordenado a Ventanas cerrar sus operaciones debido a una demanda ciudadana. Continuaba el periódico señalando que se habían generado dos incidentes, el primero el 7 de Marzo cuando el Seremi de Salud dio a conocer la presencia de altas concentraciones de

arsénico y cobre en los suelos de la escuela La Greda, localizada cerca de la fundición; y un segundo incidente, ocurrido el 23 de Marzo cuando una nube de dióxido de azufre proveniente de la fundición intoxicó a profesores y alumnos de dicha escuela.



La chimenea de la fundición de cobre de Ventanas (Chile) (imagen[26]).

Ruido Aunque el ruido difícilmente pueda ser considerado como una "emisión" en el sentido que lo puede ser un gas o un sólido, no obstante utiliza la atmósfera para moverse como una onda. La contaminación acústica asociada a la minería incluye el ruido de los motores de vehículos, la carga y descarga de roca en volquetes de acero, y otros. Así mismo tenemos los procesos de perforación, voladura, transporte, y molienda, que pueden afectar de manera significativa la vida silvestre y a los residentes cercanos.

> *Shocks and vibrations as a result of blasting in connection with mining can lead to noise, dust and collapse of structures in surrounding inhabited areas. The animal life, on which the local population may depend, might also be disturbed.*
>
> *ELAW (2010)*

A destacar en este apartado la "onda de choque" (Encyclopaedia Britannica, 2011a) que consiste en una onda de de presión fuerte que actúa en cualquier medio elástico como el aire, el agua, o una sustancia sólida. Puede ser producida por los aviones supersónicos, explosiones, rayos u otros fenómenos que crean los cambios violentos de presión. Las ondas de choque son diferentes a las ondas de sonido ya que el frente de onda se genera por un cambio repentino y violento en el estado tensional, la densidad y la temperatura del medio. Debido a esto, las ondas de choque se propagan de una manera diferente a la de las ondas acústicas ordinarias. En particular, las ondas de choque viajan más rápido que el sonido, y aumenta su velocidad a medida que su amplitud se incrementa. Sin embargo la intensidad de una onda de choque también disminuye más rápidamente que la de

una onda de sonido, ya que parte de la energía de la onda de choque se gasta en calor.

En una onda de choque hay un salto significativo en la densidad, lo que provoca un cambio significativo en el índice de refracción del aire, así que lo que estamos viendo en realidad es la distorsión de la luz (ver figura inferior):



Ondas de choque producto del disparo de armas de fuego, que son observables mediante fotografía Schlieren, una técnica que permite apreciar los cambios de densidad en el aire y por lo tanto las ondas de choque (imágenes[27,28]).

3.2 Suelos, receptores universales de la contaminación

3.2.1 Una introducción al tema

El suelo constituye la "epidermis" de nuestro planeta, y se forma como consecuencia de la interacción entre las rocas y la atmósfera. El suelo sufre de forma directa las consecuencias de un sinnúmero de actividades humanas, entre las que deberíamos destacar (en primer lugar) la construcción. El hormigón y el ladrillo sepultan los suelos. Seamos claros en este sentido, ya que aunque no nos percatemos de este hecho, las ciudades constituyen "el" o al menos "uno" de los impactos ambientales más graves generados por el hombre sobre la naturaleza en general y los suelos en particular. Solo pensemos en los cientos de kilómetros cuadrados construidos dentro de lo que se denomina el casco urbano de una gran ciudad. Agreguemos a esto los residuos que generamos diariamente, líquidos y sólidos, los escapes de gases desde los coches, autobuses, etc.

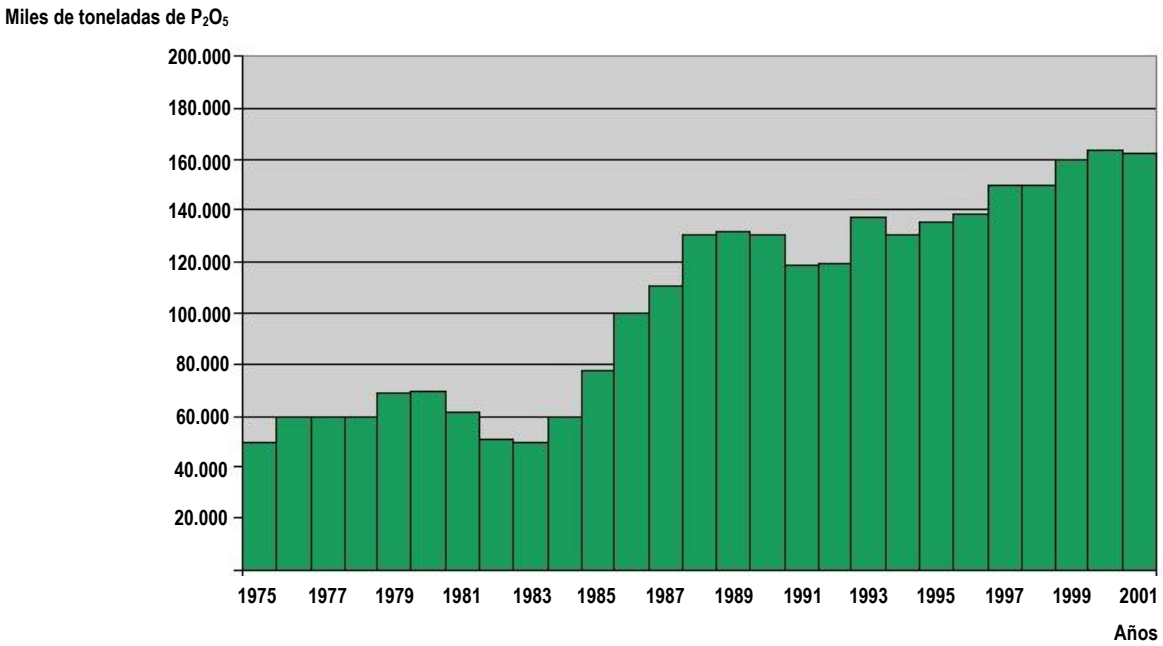


Vista parcial de Santiago de Chile, ciudad que cubre una superficie de suelo superior a los 600 km^2, es decir, más de 60.000 ha de terreno (imagen[29]).

Esto sin contar con los impactos externos derivados, una ciudad debe recibir energía, ser alimentada, recibir agua, recibir insumos y así hasta un largo etcétera. Porque cuando encendemos la luz en casa habrá que pensar que el cable de cobre que transmite la electricidad tuvo su origen último en alguna mina del

mundo, que la generación de electricidad se ha realizado al coste de construir una central hidroeléctrica o poner en funcionamiento una térmica que quema carbón, diesel o gas. Todo esto para satisfacer las necesidades vitales de 5 o 10 millones de habitantes en una gran urbe.

Pero las ciudades no constituyen ni remotamente la única forma de impactar los suelos, a estas debemos sumar una actividad que pasa desapercibida en gran medida ya que se camufla con el entorno, nos referimos a la agricultura. Por ejemplo, un país como Chile tiene unos 30 millones de hectáreas cultivadas (INE, 2007), y esos suelos requieren la adición de ingentes cantidades de fertilizantes y pesticidas para conseguir un rendimiento económico adecuado (ver figura inferior).



Consumo estimado de fertilizantes fosfatados en Chile para el periodo 1975-2001. Adaptada de IVEX Chile (2003).

Todos los fertilizantes van obviamente a parar al suelo, y aunque una parte será consumida por la planta cultivada, otra permanecerá en la matriz del suelo y de ahí podrá ser lavada e incorporada a las aguas de superficie o subterráneas. De cualquier manera, hablamos de elementos que el suelo originalmente no poseía y por lo tanto se diga como se diga, se trata de una perturbación del sistema original.

Tradicionalmente se consideró que el suelo "lo aguantaba todo", que se podía verter sobre él todo lo que se desease, que tenía una capacidad de absorción y purificación prácticamente infinita. Esto no era más que una verdad a medias. Las capacidades depuradoras de los suelos existen, pero actúan a tan largo plazo que es necesario considerar que a la escala de tiempo humano la regeneración de los suelos no se produce al ritmo suficiente como para impedir graves problemas de contaminación. En este sentido son necesarias políticas preventivas, para evitar

que esta contaminación se produzca, y medidas correctoras que permitan recuperar lo más rápidamente posible los suelos afectados por esta problemática. La necesidad de protección del suelo se puso de manifiesto en 1972 por el Consejo de Europa en su Carta Europea del Suelo, donde se establecieron los 12 principios generales de protección de éstos:

- *El suelo es uno de los bienes más apreciados de la humanidad. Permite la vida de los vegetales, los animales y las personas en la superficie de la Tierra.*
- *El suelo es un recurso limitado y fácil de destruir.*
- *La sociedad industrial utiliza el suelo para la agricultura, la industria y otros fines. La política de ordenación del territorio debe concebirse en función de las propiedades del suelo y de las necesidades de la población actual y futura.*
- *Los agricultores y silvicultores deben aplicar métodos que preserven la calidad del suelo.*
- *Los suelos deben ser protegidos contra la erosión.*
- *Los suelos deben ser protegidos contra la contaminación.*
- *El desarrollo urbano debe ser organizado de manera que se cause el menor daño posible a las áreas vecinas.*
- *La repercusión de las obras de ingeniería civil sobre los suelos deber ser evaluada para adoptar las medidas de protección adecuadas.*
- *Es indispensable un inventario del recurso suelo.*
- *Para la utilización racional del recurso suelo es necesario un esfuerzo de investigación científica y colaboración interdisciplinar.*
- *La conservación del suelo debe ser materia de enseñanza a todos los niveles y de información pública actualizada.*
- *Los gobiernos y las autoridades deben impulsar la planificación y administración racional de los recursos del suelo.*

Con posterioridad a este documento se publicó otro por la Comisión Europea en 2002 llamado “Hacia una estrategia temática para la protección del suelo” en que se planteaba que sus principales funciones son (CAM, 2011):

- *Es fuente de alimentos y producción de biomasa.*
- *Constituye uno de los principales factores para la protección del agua y de intercambio de gases con la atmósfera.*
- *Constituye el hábitat de numerosos organismos, desempeñando funciones ecológicas esenciales.*
- *Sirve de base a las actividades humanas y constituye un elemento del paisaje y del patrimonio cultural de la humanidad.*
- *Es fuente de materias primas.*

Algunas de las características que diferencian el suelo de otros recursos son las siguientes:

- *Es un recurso prácticamente no renovable, con una cinética de degradación relativamente rápida y tasas de formación y regeneración extremadamente lentas.*
- *Tiene una gran capacidad de almacenaje y amortiguación, debida en gran parte a su contenido en materia orgánica. Dicha capacidad está relacionada tanto con el agua, los*

minerales y los gases como con un gran número de contaminantes químicos. Cuando se superan los umbrales de irreversibilidad de almacenaje y amortiguación de éstos en el suelo, se produce su liberación y distribución en otros medios.

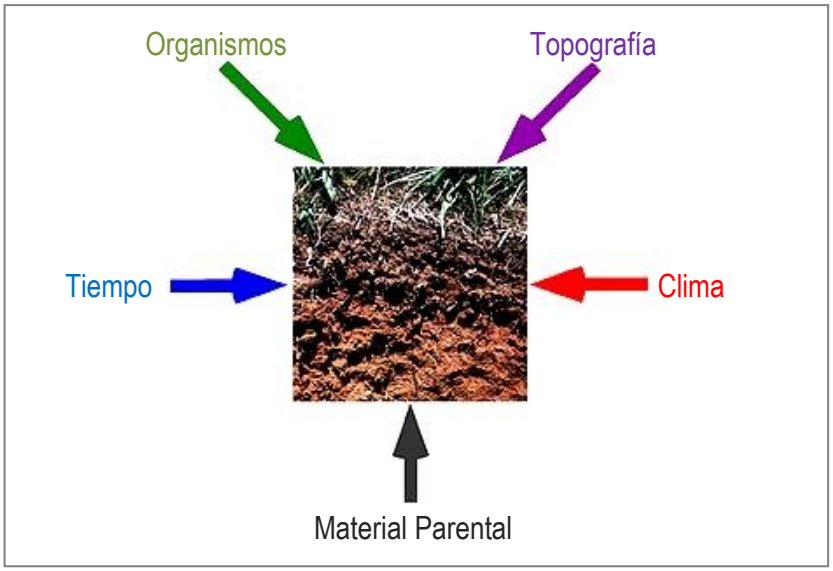
- *Es un medio vivo con gran biodiversidad. La actividad biológica contribuye a determinar la estructura y fertilidad del suelo y resulta fundamental para que pueda realizar algunas de sus funciones.*
- *A diferencia del aire y el agua, el suelo es un recurso que está generalmente sujeto a derechos de propiedad.*

En el siguiente tema estudiaremos las características del suelo que resultan de interés para entender los mecanismos que pueden llevar a su contaminación

3.2.2 Propiedades de los suelos

El suelo constituye la interfase entre las rocas del substrato continental y la atmósfera, formándose como consecuencia de los fenómenos físicos, físico-químicos y biológicos de intercambio que ahí se producen.

El concepto de suelo es, por tanto, un concepto evolutivo. Se forma como consecuencia de un proceso dinámico, que implica un cambio progresivo desde que la roca se pone en contacto con la atmósfera como consecuencia de la erosión hasta su desarrollo completo.

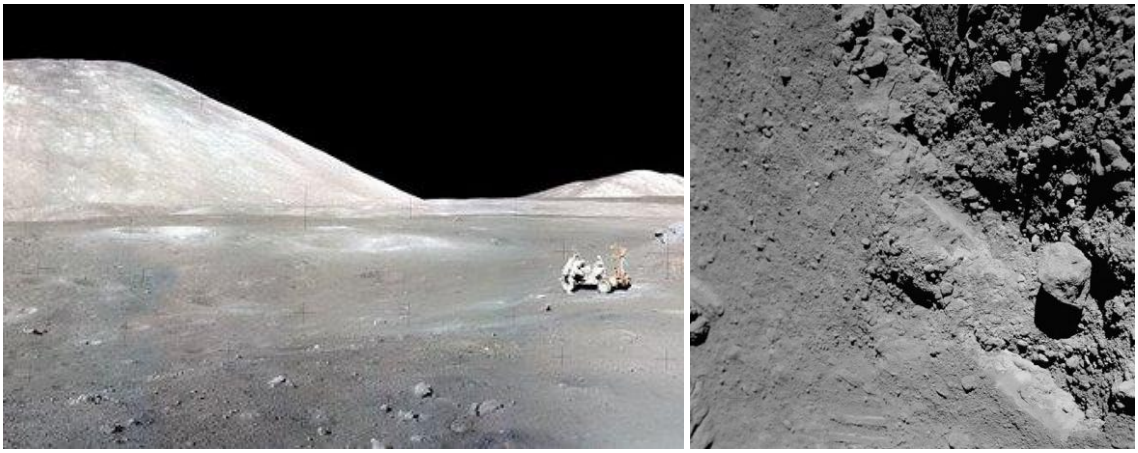


Distintos factores que controlan la formación y evolución de un suelo. Figura adaptada de Pidwirny (2011).

Un concepto muy relacionado es el de regolito, que constituye lo que podríamos llamar el "protosuelo", es decir, una capa no estructurada de materiales que se acumula sobre la superficie del terreno como consecuencia de procesos diversos. Por su parte, el suelo es un regolito evolucionado, que ha adquirido la estructuración en capas u horizontes que le es característica. Por ejemplo, la

superficie de la Luna está cubierta por el regolito lunar, formado por fragmentos de rocas y polvo que han resultado de los impactos de meteoritos, y de la acumulación de polvo cósmico, sin que se forme un suelo debido a la ausencia de una atmósfera, agua, y una dinámica superficial que permita su desarrollo. También en las zonas de alta montaña, por encima de determinadas altitudes, en las que ya no llega a desarrollarse vegetación, tenemos un regolito formado por los restos de la meteorización del sustrato.



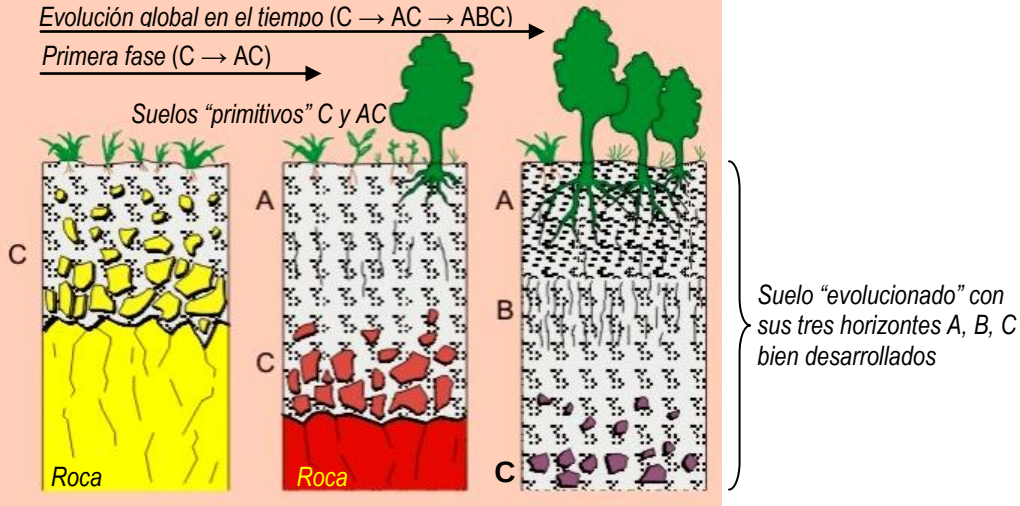


Regolitos. Arriba, el típico regolito de los cerros del Desierto de Atacama, que da esa aparente suavidad de formas; abajo, el regolito lunar, toma general y detalle a la derecha (imágenes[30,31]).

Cuando eliminamos el suelo de una porción de terreno, al cabo de unos meses o unos pocos años observamos que comienza a implantarse vegetación, que se forman acumulaciones de tierra, y que los fragmentos de rocas comienzan a redondear sus formas, liberando fragmentos menores. Es decir, se está formando un regolito, que constituye el punto de partida de la edafogénesis, es decir la formación de un suelo.

En la formación de un suelo (o edafogénesis; del griego *edafos* = suelo y *genesis* = nacimiento, creación, origen) se reconocen una serie de pasos evolutivos, que van desde la meteorización temprana de la roca dando lugar a un horizonte desestructurado llamado C, pasando por la implantación de la vegetación y un suelo vegetal, esto es, un horizonte A, hasta la formación de un horizonte de intercambio entre A y C denominado B:

- El primer horizonte en formarse es el denominado Horizonte C, en contacto directo con la roca más o menos meteorizada del sustrato, y compuesto mayoritariamente por fragmentos de ésta, acompañados por productos poco evolucionados de su meteorización.
- Luego se forma el Horizonte A que se forma como consecuencia de la implantación de vegetación sobre el regolito. En esta zona se desarrolla la actividad de las raíces, la acumulación de los restos vegetales, la actividad animal (lombrices, insectos u otros animales excavadores), y la acumulación de los productos de la meteorización superficial (arcillas, cuarzo).



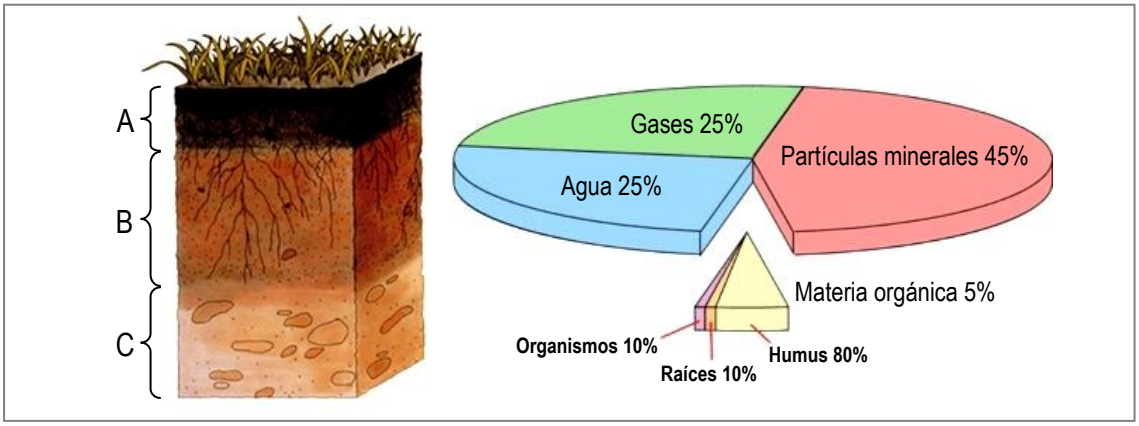
Formación de suelos, desde lo más primitivo (solo un horizonte C) hasta los tipos más evolucionados (ABC).

Estos suelos primitivos AC son característicos de áreas sometidas a fuerte erosión en las que no da tiempo al desarrollo de un suelo completamente estructurado, aunque también pueden tratarse de suelos jóvenes en formación.

- Cuando el suelo evoluciona durante un tiempo lo suficientemente largo se forma un nuevo horizonte, el Horizonte B o de "acumulación". Esta capa del suelo se origina como consecuencia de los procesos de intercambio que se producen entre los horizontes A y C. La migración de las aguas, tanto descendentes (de infiltración de aguas de lluvia) como ascendentes (capilaridad, gradiente de humedad), hace que llegue a individualizarse este

horizonte caracterizado por la acumulación de precipitados salinos (carbonatos, sulfatos) y arcillas.

Estos tres horizontes son los básicos y fundamentales que podremos encontrar en la mayor parte de los suelos comunes. En mayor detalle, es posible identificar otros horizontes, o subdividir éstos, pero no vamos a entrar en estos aspectos.



Suelos. A la izquierda perfil típico de un suelo desarrollado con sus horizontes A, B, y C; a la derecha, componentes fundamentales de un suelo promedio. Figuras adaptadas de Pidwirny (2011).

3.2.3 Composición de los suelos

Los suelos son entidades complejas formadas por una serie de componentes que analizaremos a continuación. Entre estos a destacar, los minerales, el agua, la materia orgánica y los gases retenidos (ver figura anterior).

Minerales Los minerales que componen el suelo pueden ser tan variados como lo sea la naturaleza de las rocas sobre las que se implanta. No obstante, hay una tendencia general de la mineralogía del suelo hacia la formación de fases minerales que sean "fisicoquímicamente estables". A su vez esto está condicionado por el factor composicional y el climático, que controla la temperatura, la pluviosidad, y la composición de las fases líquida y gaseosa en contacto con el suelo. De esta manera los minerales del suelo podrán ser de dos tipos: 1. Heredados, es decir, procedentes de la roca-sustrato; estos, son minerales estables en condiciones atmosféricas, resistentes a la alteración físico-química. 2. Formados durante el proceso edafológico, por alteración de los minerales de la roca-sustrato que no son estables en estas condiciones. Los más abundantes son los siguientes:

- Cuarzo. Es un mineral muy común en los suelos debido a su abundancia natural en muchas rocas y su resistencia al ataque químico. El cuarzo confiere al suelo buena parte de su porosidad, debido a que suele estar en

forma de granos más o menos gruesos, lo que permite el desarrollo de la porosidad intergranular. Además, es un componente muy inerte del suelo.

- Feldespatos. Suelen ser componentes minoritarios, residuales de la roca sobre la que se forma el suelo pues son meta-estables en el medio atmosférico, tendiendo a transformarse en minerales de arcilla. Al igual que el cuarzo, conforman la fracción arenosa del suelo, si bien en este caso le confieren una cierta reactividad.
- Fragmentos líticos. Junto con los dos componentes anteriores, conforman la fracción comúnmente más gruesa del suelo, si bien en este caso el tamaño de los fragmentos suele ser superior a 2 cm. De esta manera el cuarzo y los feldespatos suelen constituir la fracción arenosa del suelo, mientras los fragmentos de roca constituyen la fracción de tamaño grava. La naturaleza de los fragmentos está directamente relacionada con la de la roca sobre la que se forman, si bien ocasionalmente el suelo puede contener fragmentos de origen "externo" como consecuencia de procesos de transporte y depósito contemporáneos con la formación del suelo. En cualquier caso, son siempre heredados, y nos permiten identificar si el proceso de edafogénesis ha tenido o no aportes externos.
- Arcillas. Una cuestión importante en la formación del suelo es la génesis de los minerales más característicos del mismo, las arcillas. La formación de los minerales de arcilla en este ambiente está íntimamente ligada a reacciones de hidrólisis de los minerales silicatados de las rocas. Estas reacciones pueden desarrollarse en el medio hidrotermal (durante la formación de un depósito mineral), o como procesos exógenos (bajo condiciones atmosféricas) una vez que por erosión las rocas se encuentran en la superficie o su proximidad. El CO_2 disuelto en el agua de lluvia o de los ríos puede desencadenar una serie de procesos hidrolíticos:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

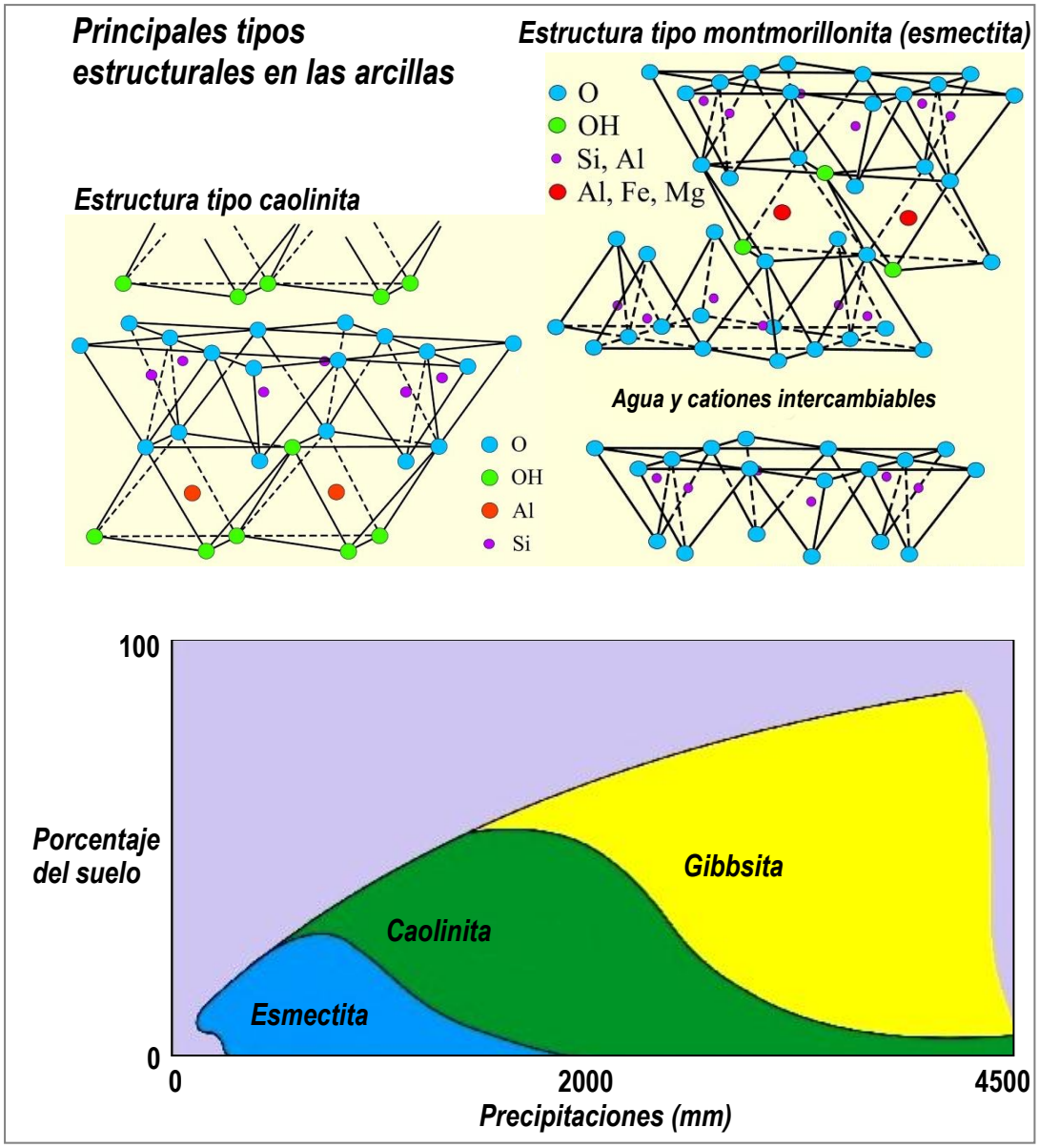
El ácido carbónico así formado reacciona con los feldespatos, induciendo la formación de minerales del grupo de la arcilla. A continuación ilustramos este tipo de reacciones con tres ejemplos conducentes a la formación de caolinita:

Hidrólisis de la anortita (plagioclasa cálcica):
$CaAl_2Si_2O_8 + 2\ H_2CO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- + Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Caolinita

Hidrólisis de la albita (plagioclasa sódica): $2\ NaAlSi_3O_8 + 2\ H_2CO_3 + 9\ H_2O \rightarrow 2\ Na^+ + 2\ HCO_3^- + Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 4\ H_2SiO_4$
Caolinita

Hidrólisis de la ortoclasa (feldespato potásico): $2\ KAlSi_3O_8 + 2\ H_2CO_3 + 9\ H_2O \rightarrow 2\ K^+ + 2\ HCO_3^- + Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 4\ H_2SiO_4$
Caolinita

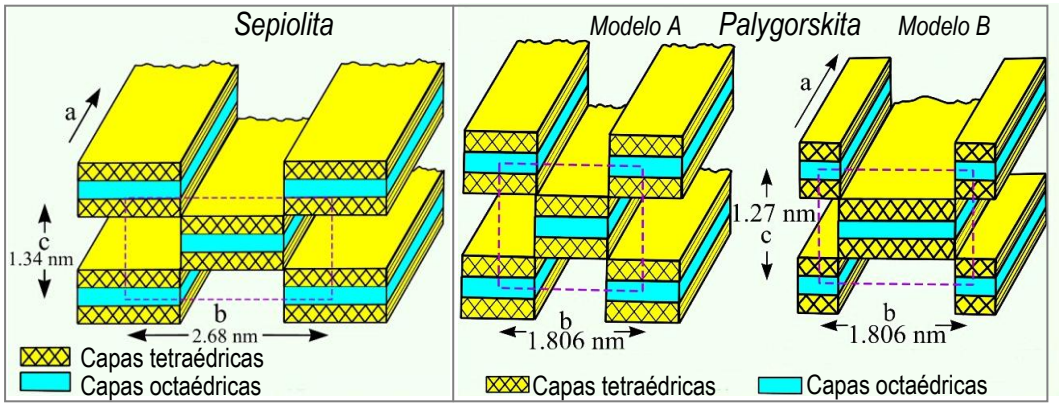
El clima, a través de los parámetros de humedad y temperatura, controla fuertemente el proceso formador de arcillas a partir de los silicatos. Así, en condiciones de humedad y calor la hidrólisis dará lugar a arcillas caoliníticas e incluso a un residuo final de gibbsita ($Al(OH)_3$). Por el contrario, en climas áridos la arcilla predominante resulta ser del tipo montmorillonita (esmectita).



Arriba, estructuras de arcillas tipo caolinita y montmorillonita. Adaptada de USGS (2001); abajo, relaciones suelo — fase mineral — precipitaciones.

Las arcillas son minerales tipo filosilicatos muy abundantes en el suelo, constituyendo la matriz general del mismo. Son minerales que proceden de la alteración de los que componen la roca sobre la que se producen los procesos de meteorización, y en función de ello pueden ser muy variados como por ejemplo, la illita (= *sericita*), que se forma a partir de los

feldespatos. Otros filosilicatos incluyen la clorita, que se forma a partir de los minerales ferromagnesianos que pueda contener la roca (biotita, anfíbol, piroxeno, olivino); la pirofilita, que puede formarse a partir de minerales ricos en aluminio en la roca original; menos comunes son los filosilicatos del grupo de las arcillas especiales (esmectita-bentonita, sepiolita-palygorskita), que se forman bajo condiciones climáticas muy específicas, o a partir de rocas de composición muy determinada, y que por sus características especiales confieren al suelo propiedades mecánicas diferentes a las habituales (suelos expansivos, suelos inestables). Las arcillas juegan un papel muy importante en la textura y en la físico-química del suelo, pues le confieren plasticidad, impermeabilidad, así como otras propiedades mecánicas. También juegan un importante papel en la adsorción e intercambio iónico (ver figura anterior). Por su parte, determinadas arcillas, como la sepiolita y palygorskita (arcillas fibrosas) poseen estructuras cristalinas tipo túnel (ver figura inferior), que pueden albergar cationes y líquidos (agua y otros fluidos).



Modelos estructurales para la sepiolita y palygosrkita. Adaptada de USGS (2001).

- Carbonatos. Los carbonatos son minerales frecuentemente formados durante el proceso de edafogénesis, aunque debido a su alta solubilidad su acumulación no suele producirse en el horizonte más superficial. De hecho, los carbonatos pueden formarse en los horizontes A o C, pero su acumulación efectiva se produce sólo en el horizonte B o de acumulación, como consecuencia de los procesos de intercambio que se producen en el mismo. Una excepción corresponde a los suelos de regiones de climatología semiárida y con abundantes rocas carbonatadas. En estas regiones, los procesos de intercambio con el suelo suelen ser "en ascenso": las aguas subterráneas ricas en carbonatos ascienden hasta la superficie del terreno por capilaridad o por gradiente de humedad, depositando ahí los carbonatos, y originando los denominados "caliches" (no confundir con el término chileno para los nitratos del Desierto de Atacama), auténticos

escudos que recubren la superficie del suelo, como por ejemplo ocurre en buena parte de La Mancha.



Caliche en un suelo de Marruecos (imagen[32]).

- Óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio. Los óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} (y los de Mn^{3+} y Mn^{4+}) son minerales que se suelen acumular en el suelo como consecuencia de procesos de alteración de otros minerales, constituyendo la fase estable del hierro (y manganeso) en superficie o en condiciones cercanas a la superficie. Se acumulan en forma de agregados: 1) limonita, principalmente formas precursoras de goethita (FeOOH), 2) bauxita (de óxidos e hidróxidos de aluminio); y 3) wad (óxidos e hidróxidos de manganeso). Acumulaciones de estos minerales son típicos de las "lateritas", suelos residuales formados en regiones tropicales.

  Los óxidos de manganeso poseen propiedades interesantes de captación de cationes. Entre éstos cabe destacar los óxidos tetravalentes criptomelana, todorokita, litioforita y birnessita. Los dos primeros presentan estructuras cristalinas tipo túnel, mientras que la litioforita y birnessita se presentan en capas. Todos estos óxidos de manganeso están basados en unidades tetraédricas de MnO_6, que comparten vértices o aristas. En las estructuras tipo túnel se pueden introducir cationes tipo Co^{2+}, Ni^{2+} y Cu^{2+} en las posiciones octaédricas. En cuanto a las estructuras en capas, es posible que cationes tipo Co^{2+} sustituyan al manganeso en las posiciones octaédricas de MnO_6. En lo que se refiere a las fases oxidadas de hierro, están juegan un papel ambiental crucial en la depuración de arsénico en las aguas mediante adsorción de la fase arsenical.

> ***Laterite**, soil layer that is rich in iron oxide and derived from a wide variety of rocks weathering under strongly oxidizing and leaching conditions. It forms in tropical and subtropical regions where the climate is humid. Lateritic soils may contain clay minerals; but they tend to be silica-poor, for silica is leached out by waters passing through the soil. Typical laterite is porous and claylike. It contains the iron oxide minerals goethite, $HFeO_2$; lepidocrocite, $FeO(OH)$; and hematite, Fe_2O_3. It also contains titanium oxides and hydrated oxides of aluminum, the most common and abundant of which is gibbsite, $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$. The aluminum-rich representative of laterite is bauxite ...*
>
> *Encyclopaedia Britannica (2011b)*



Suelo laterítico con su típico color rojo (imagen[33]).

- Sulfatos. La presencia de sulfatos en el suelo suele tener la doble vertiente de que pueden ser minerales relativamente comunes, sin embargo, al ser compuestos de solubilidad relativamente alta, su acumulación efectiva solo puede producirse bajo condiciones muy determinadas como la abundancia de sulfatos (p.ej., yesos) en el entorno inmediato, y clima árido o semiárido. En estas condiciones, y al igual que los carbonatos, los sulfatos podrán acumularse en el horizonte B, o en el A, en este segundo caso en forma de costras o eflorescencias (rosas del desierto).



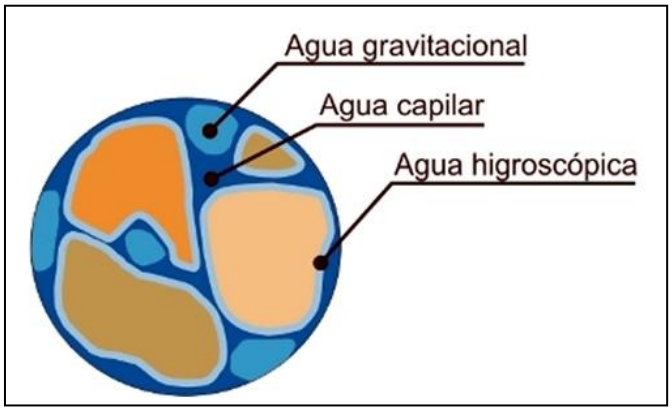
Suelos yesíferos en los espartales de la hoya de Baza (Granada). Del Río (2010).

Agua en el suelo Con la excepción de las regiones extremadamente áridas, el agua es siempre un componente del suelo, encontrándose en éstos en forma de humedad intergranular o como hielo (suelos tipo permafrost). Desde un punto de vista físico hay tres tipos de agua:

- Agua gravitacional, que es el agua que se introduce y fluye a través del suelo por efecto de las fuerzas gravitatorias.
- Agua capilar, que es el agua que se mantiene por tensión superficial sobre las superficies de las partículas y agregados del suelo, y rellenando huecos y poros capilares interpartículas. En esta fase se distingue el agua capilar absorbible y la no absorbible. El agua capilar no absorbible se halla en los

tubos capilares más pequeños <0,2 micras. Está fuertemente retenida y no es absorbible por las plantas; la fuerza de succión es de 15-31 atmósferas. Por su parte el agua capilar absorbible es la que se encuentra en tubos capilares de 0,2 a 8 micras. Es un agua absorbible por las plantas (reserva en periodos secos). La fuerza de retención varía entre 1 y 15 atmósferas.

- Agua higroscópica es el agua se mantiene fuertemente adherida a las partículas por fuerzas de adhesión. Forma una lámina alrededor de las partículas, cuyo espesor es de unas decenas de moléculas de agua. No es aprovechable por las plantas.

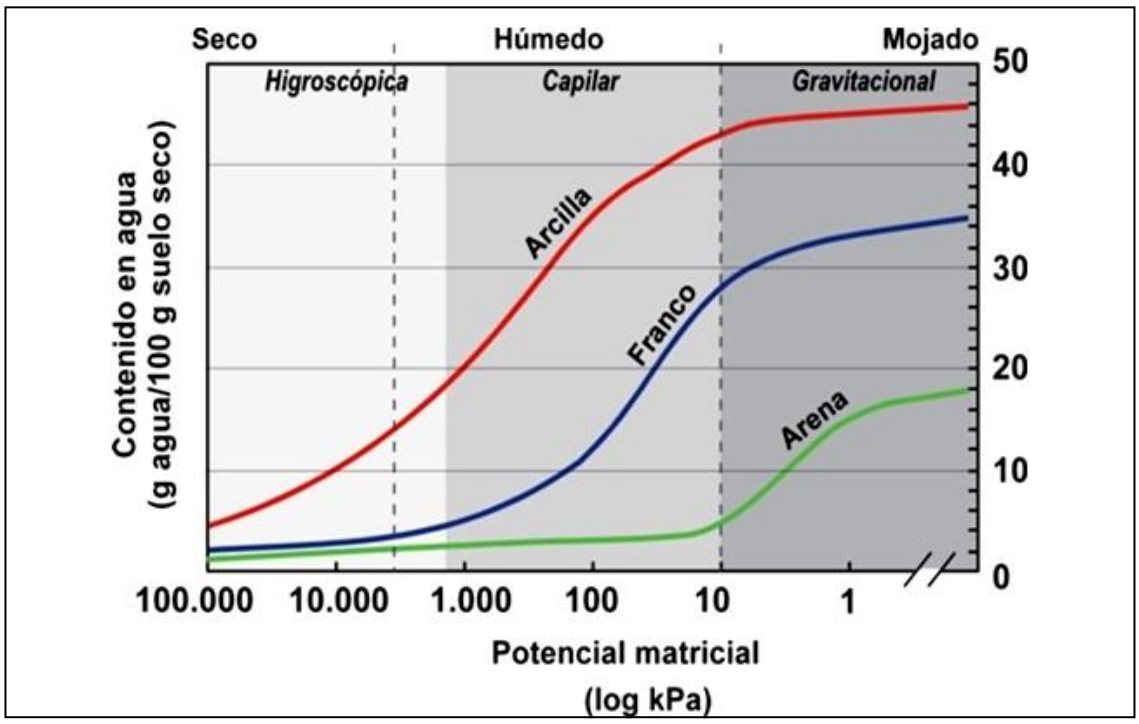


Tipos de agua en el suelo.

El movimiento, retención, disponibilidad, y pérdida de agua en el suelo están controlados por gradientes energéticos, y las formas de energía implicadas son la energía potencial (en relación a la posición), la cinética (en relación al movimiento) y la eléctrica (en relación con las especies iónicas en disolución).

El potencial es la diferencia entre la energía del agua en el suelo y la del agua pura "libre" a la misma temperatura (el potencial del agua pura de referencia es "cero", por lo cual el potencial en un suelo saturado generalmente será negativo). En otras palabras, es el trabajo que habría que ejercer para llevar el agua al estado de referencia.

Por otra parte, el conjunto de fuerzas que retienen el agua del suelo se llama potencial de succión. Este es igual al potencial matricial más el osmótico, al que se oponen el potencial gravitacional y el potencial neumático (que tienden a sacar el agua de los poros). El potencial (sea matricial o sea total) se puede relacionar con el contenido en agua y la textura del suelo, siendo la arcillosa la que tiene mayor capacidad de retención de agua.



Tipos de agua, texturas de suelos y el potencial matricial.

El agua en el suelo suele tener una dinámica bidireccional. El agua de lluvia o de escorrentía, por lo general poco cargada en sales (aunque no siempre), se infiltra desde la superficie, y puede producir fenómenos de disolución, hidrólisis y/o precipitación de las sales que contiene. Por ejemplo, el CO_2 atmosférico reacciona con el agua formando H_2CO_3. A su vez ese ácido carbónico puede reaccionar con los carbonatos de la roca disolviéndolos:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

En épocas secas se produce el fenómeno inverso, y las aguas contenidas en los acuíferos tienden a subir por capilaridad o por gradiente de humedad hasta la superficie, donde se evaporan progresivamente, precipitando durante el trayecto las sales en disolución. Este proceso puede tener consecuencias desastrosas cuando interviene la mano del hombre, por ejemplo con irrigación de suelos en zonas áridas-semiáridas, con consecuencias de salinización extrema. Ejemplos dramáticos de estos fenómenos se encuentran en algunas regiones de Australia y se están comenzando a observar en Almería debido a la descontrolada actividad agrícola.

La composición del agua contenida en el suelo, en cuanto a su contenido en sales solubles (bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros) estará condicionada, como la mineralogía, por factores de la litología del suelo y su entorno, y por factores climáticos.




Procesos de salinización avanzada en Australia (imágenes[34,35]).

<u>*Gases en el suelo*</u> El suelo a menudo contiene gases que pueden tener procedencias diversas. La fase gaseosa se localiza en los poros y huecos no ocupados por agua. Esta permite la respiración de los organismos del suelo y de las raíces de las plantas. También ejerce un papel de primer orden en los procesos *redox* (reducción-oxidación) que tienen lugar en el suelo. Por otra parte, la fase gaseosa del suelo está constituida por una mezcla de gases de composición cualitativamente parecida a la atmósfera pero con proporciones diferentes de sus componentes:

Componente	Gas del suelo	Aire
Oxígeno	10 – 20 %	21 %
Nitrógeno	78,5 – 80 %	78 %
Dióxido de carbono	0.2 – 3.5 %	0.03 %
Vapor de agua	En saturación	Variable
Otros	< 1 %	> 1 %

Composición media de los gases en suelos.

El aire del suelo está en continuo intercambio con el aire atmosférico. Este intercambio puede realizarse por movimiento en masa o por difusión:

- Movimiento en masa: Se debe a variaciones de temperatura y de presión entre las distintas capas del suelo y entre el suelo y la atmósfera. Estos gradientes hacen que se establezcan flujos entre el suelo y la atmósfera. Las diferencias de presión se relacionan con movimientos en masa de aire (viento) y agua.
- Difusión: La superficie del suelo constituye una interfase donde tiene lugar un intercambio selectivo de los gases del suelo con los de la atmósfera para tratar de equilibrar su composición. Así, cuando en el suelo aumenta el CO_2,

se produce una difusión de éste a la atmósfera y si en el suelo disminuye el O_2 se produce una difusión del oxígeno de la atmósfera al suelo.

Este intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera es el principal causante de la renovación del aire del suelo. Por su parte, la aireación (intercambio de gases con la atmósfera) del suelo depende de varios factores, como la textura, estructura, densidad, contenido en agua, y profundidad. Las condiciones de aireación de los suelos condicionan a su vez las condiciones *redox* del propio suelo.

A su vez, el contenido de CO_2 depende de varios factores:

- La respiración de los organismos. Su importancia en la composición del aire en el suelo se pone de manifiesto por las diferencias estacionales que se observan en el contenido de dióxido de carbono. Los máximos corresponden a los periodos de máxima actividad.
- La transformación de la materia orgánica. La influencia de este factor se hace patente cuando se somete a un suelo a estercolado o compostaje.
- El sistema carbonato-bicarbonato y la presencia de calcio en la solución del suelo. El primero condiciona su distribución, pues en las zonas en que la presión parcial del dióxido de carbono es elevada se produce la transformación del carbonato cálcico en bicarbonato soluble, que migra en el perfil hasta llegar a zonas donde la presión parcial es menor y desprende CO_2, precipitando de nuevo carbonato que se concentra en determinados niveles (horizontes cálcicos). Incluso cuando no existen carbonatos en el suelo, pero si hay calcio en la solución, parte del dióxido de carbono puede fijarse como carbonato cálcico.

Materia orgánica La materia orgánica que contiene el suelo procede tanto de la descomposición de los seres vivos que mueren sobre ella, como de la actividad biológica de los organismos vivos que contiene. Aquí debemos distinguir entre dos procesos opuestos, la “humificación” y la “mineralización”:

- La humificación es el conjunto de procesos responsables de la transformación de la materia orgánica en humus.
- La mineralización es la destrucción total de los compuestos orgánicos dando lugar a productos sencillos como CO_2, NH_3, H_20, etc.

Así la humificación es responsable de la acumulación de materia orgánica en el suelo mientras que la mineralización conduce a su destrucción. Por su parte, en la transformación de los restos orgánicos se diferencian tres etapas sucesivas:

1. Transformación química previa. Es una alteración que sufren los restos vegetales antes de caer al suelo.

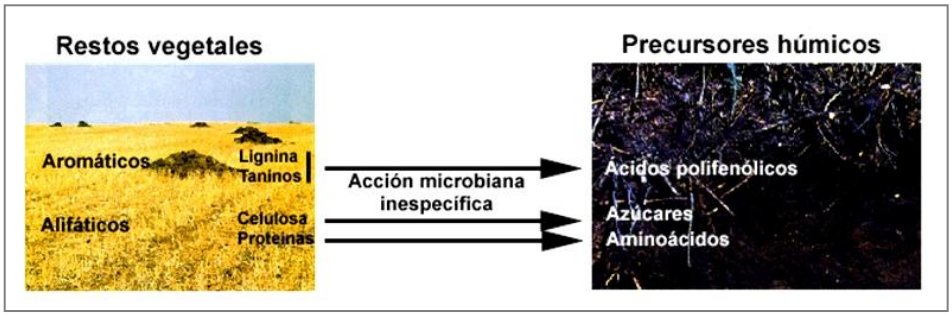
2. Acumulación y destrucción mecánica de los restos vegetales (hojarasca, ramas, tallos, etc.) que se acumulan sobre el suelo.
3. Alteración química. Es la transformación química que comprende la humificación y mineralización

Existen varios factores que inciden en el proceso de humificación:

- Microorganismos en el suelo. Las bacterias, hongos y actinomicetos son decisivos para el desarrollo de la humificación.
- Las características de los restos vegetales (cantidad, relación C/N, tamaño). Los microorganismos necesitan el carbono (oxidan el C y lo devuelven a la atmósfera como CO_2) y el nitrógeno como fuente de energía, y ambos los toman fundamentalmente de los restos vegetales. El C en estos es muy abundante, aproximadamente del 58%. El N es un elemento minoritario, y las raíces de las plantas y los microorganismos compiten por el.
- Las características del suelo. La existencia de nutrientes, pH, aireación y minerales.
- El clima. Las condiciones climáticas extremas (temperatura, humedad) van a impedir o restringir la actividad microbiana. Los climas fríos y áridos generan una actividad restringida. Los climas cálidos o templados y relativamente húmedos favorecen la humificación. Este es un factor muy relacionado con el tipo de vegetación.

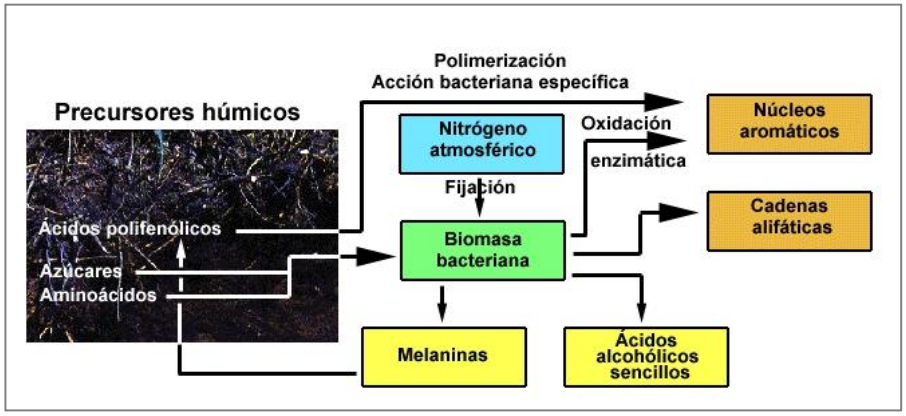
El proceso de humificación pasa por varias etapas:

1. Etapa de despolimerización enzimática o humificación directa. La celulosa y la lignina de los restos vegetales son atacadas por hongos y actinomicetos, mientras que las proteínas son destruidas por las bacterias con liberación de nitrógeno, lo que a su vez facilita el crecimiento fúngico y hace posible la continuidad del proceso transformador. Las substancias aromáticas se destruyen, formándose ácidos polifenólicos sencillos (precursores húmicos), derivados preferentemente de la rotura de la lignina. La celulosa se transformará en azúcares y las proteínas, en aminoácidos.



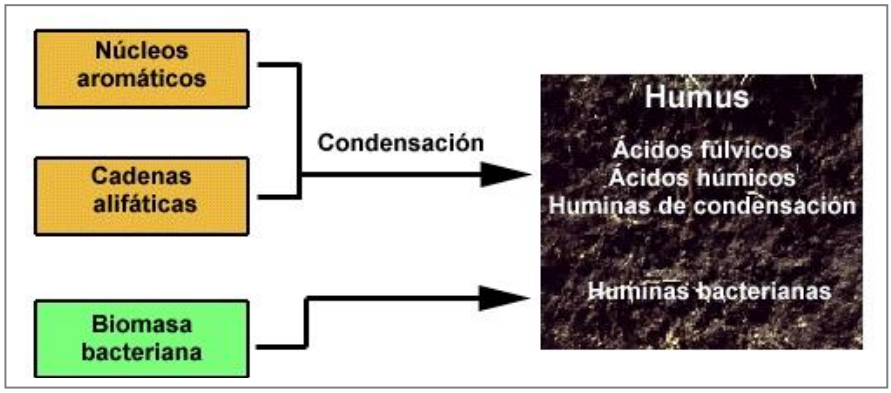
Inicio del proceso humificación (imagen[36]).

Etapa de polimerización y oxidación enzimática. Si la oxidación del producto bacteriano es incompleta, los azúcares forman sustancias parecidas a las melaninas, de naturaleza cíclica, que engrosan el grupo aromático de los precursores húmicos. También se producen condensaciones entre los aminoácidos y los ácidos alcohólicos para generar cadenas alifáticas que constituirán los terminales activos de las sustancias húmicas.



Segunda fase del proceso humificación (imagen[36]).

2. Etapa de polimerización y condensación. Los compuestos aromáticos, por la acción de grupos de bacterias específicas se fragmentan y generan quinonas, susceptibles de polimerizarse y generar núcleos aromáticos de masa molecular elevada que son la base de todas las substancias húmicas. Sobre estos núcleos aromáticos se insertan las cadenas alifáticas ya formadas, para generar los ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas de condensación que son los componentes primordiales del humus



Fase final del proceso humificación (imagen[36]).

Aparte de los procesos de transformación de la materia orgánica, también debemos mencionar aquí otros "integrantes" orgánicos de los suelos, nos referimos a las lombrices, insectos de todo tipo, microorganismos, etc.

Otro dato relevante con respecto a la materia orgánica es su afinidad por los metales pesados. Cuando éstos se encuentran en disolución, a menudo forman

complejos orgánicos solubles, que pueden polimerizarse sobre los complejos moleculares del humus. También pueden formar directamente complejos insolubles con los compuestos del humus. De esta forma, la materia orgánica del suelo a menudo actúa como almacén de estos elementos, si bien puede transferirlos a la vegetación o a la fase acuosa si se produce su descomposición en medio ácido u oxidante.

3.2.4 Algunas propiedades fisicoquímicas de interés ambiental

Los suelos son receptores netos de la contaminación transportada en fase sólida, líquida e incluso gaseosa. Así es importante conocer algunas de las propiedades fisicoquímicas de este medio que son de interés para comprender los fenómenos de retención o transporte de los metales pesados. Por ejemplo, una solución ácida que transporta metales en disolución y penetra en un suelo carbonatado (recordar los caliches) perderá su capacidad de transporte porque se neutralizará y los metales quedarán retenidos en ese horizonte. Otro ejemplo, los compuestos orgánicos de un suelo que entran en contacto con un metal pueden formar compuestos órgano-metálicos con este. O ya para mencionar un último caso, el potencial *redox* de un suelo puede hacer la diferencia entre que el arsénico se incorpore a las aguas subterráneas o quede retenido ahí. ¿Por qué? Porque el transporte del arsénico está controlado por la presencia/ausencia de una fase oxidada de hierro como la goethita (FeOOH). Si el suelo tiene propiedades reductoras las fases oxidadas del hierro se reducirán, y el arsénico adsorbido en goethita quedará libre para migrar. A continuación revisaremos algunas de estas propiedades.

Adsorción La adsorción es la incorporación de materia (átomos, moléculas, iones) a las superficies de una fase (generalmente sólida) y su área de influencia (superficie difusa). Esto hace que las concentraciones de esas especies sean mayores en la proximidad de las superficies de adsorción con respecto a la concentración media en la fase líquida. La substancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama adsorbato y la fase receptora se llama adsorbente. Si se consideran varias especies químicas compitiendo por la adsorción en una fase sólida, entonces se habla de cambio o intercambio iónico. Así la adsorción de una especie disuelta depende de una serie de factores que analizaremos brevemente a continuación.

Los fenómenos de adsorción se producen debido a las cargas de superficie. Hay dos tipos de cargas de superficie:

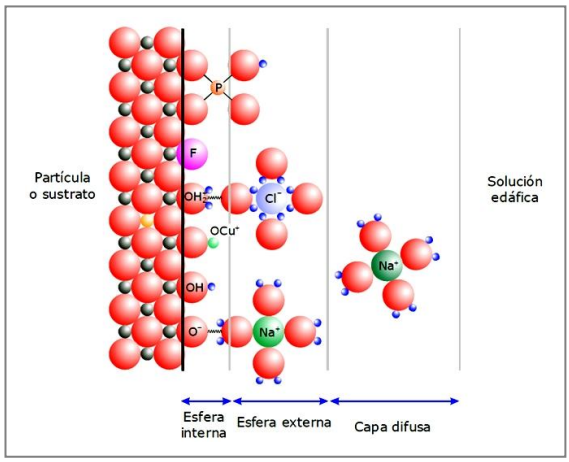
1. Carga permanente. Se genera en los filosilicatos por substituciones isomórficas. La densidad de la carga depende del número de substituciones

isomórficas y su intensidad depende de si la substitución ocurre en la capa tetraédrica (mayor intensidad) o en la capa octaédrica (menor intensidad). Las sustituciones isomórficas con cationes de menor valencia suelen ser negativas (p.ej., Si^{4+} sustituido por Al^{3+} en la capa tetraédrica y Al^{3+} sustituido por Mg^{2+} y Fe^{2+} en la capa octaédrica.

2. Carga variable. Esta depende del pH. En los minerales la carga variable se genera por la disociación de H^+ de los grupos hidroxilos (OH^-) presentes en la superficie de estos al aumentar el pH. En medios ácidos, se puede incorporar H^+ a los minerales generando cargas de superficie positivas. Este proceso ocurre en las arcillas (caolinita), óxidos, oxihidróxidos y materiales amorfos. En componentes orgánicos, la disociación y la unión con iones H^+ afecta a los grupos funcionales hidroxilo, carboxilo ($COOH^-$), fenólico ($C_6H_4OH^-$) y amina (NH^{2-}). En los medios básicos puede ocurrir con la disociación y pérdida de hidróxidos de aluminio como $Al(OH)^{2+}$, con lo que aumenta la carga negativa en la superficie del mineral.

Por su parte, los mecanismos de adsorción son los siguientes:

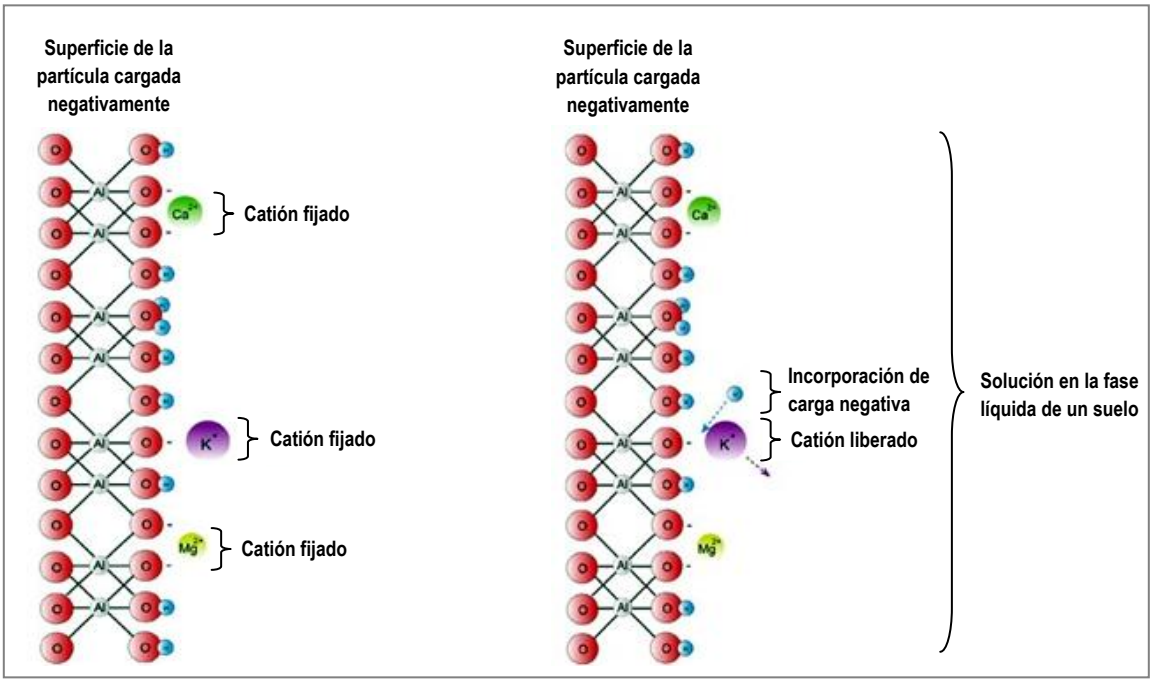
- Complejo de esfera interna. El adsorbato se sitúa en contacto directo (sin molécula de agua interpuesta) con la superficie del mineral. Por lo general, la capacidad relativa de un elemento de ser adsorbido se incrementará con su tendencia a formar complejos de esfera interna, y la tendencia de un catión a formar complejos de esfera interna será mayor cuanto mayor sea su potencial iónico (relación entre carga y radio iónico).
- Complejo de esfera externa. El adsorbato se sitúa sobre la superficie del sólido pero con una molécula de agua interpuesta entre el catión y la superficie adsorbente.
- Ión difuso. El adsorbato se encuentra como iones adsorbidos en la subcapa difusa más externa, sin que tengan que estar en contacto con la superficie.



Capas de adsorción en relación a una superficie mineral (imagen[37]).

Llegados a este punto conviene introducir otro concepto, el de "capacidad de intercambio catiónico". Se trata de la propiedad de una partícula de adsorber

cationes de la fase líquida que pasan a formar complejos de superficie, liberando al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes por destrucción de complejos de superficie previos. En este sentido, el lugar o posición que ocupan esos complejos de superficie se llaman sedes de intercambio.



Cationes fijados y liberados de una superficie cargada negativamente por adición de cargas negativas desde la solución (imagen[38]).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es importante porque controla la disponibilidad de nutrientes en el suelo, condiciona la estructura del suelo y la estabilidad de los agregados, y controla además la atenuación natural de contaminantes al poder quedar estos retenidos en el suelo. La capacidad de intercambio catiónico de un componente o muestra de suelo se expresa como el número de moles de iones de carga positiva adsorbidos que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca, en unas condiciones dadas de presión, temperatura, composición de la fase líquida, etc.

La CIC (cmol(c)/kg) de un mineral depende de la densidad de carga superficial (σ, cmol(c)/m^2 ó centimol de carga/m^2) y de su superficie específica (S, m^2/kg):

$$CIC = \sigma_p \times S_p + \sigma_v \times S_v$$

Cargas permanentes: (p) ─ Cargas variables: (v)

Componente	CIC cmol(+)/kg
Arena	0
Mica	0
Caolinita	1-10
Illita, clorita	10-40
Esmectita	80-150
Alófana	10-150
Vermiculita	120-150
Materia Orgánica	100-400

Algunos valores de CIC para distintos materiales.

A partir de la figura superior ya podemos intuir que algunos materiales tendrán una nula capacidad de retención de metales y que otros los fijarán con gran facilidad. El caso de las arenas es particularmente significativo, ya que al constituir un medio altamente poroso y permeable, los contaminantes en fase líquida pasarán a través de él con entera facilidad y de ahí (en ausencia de otras barreras) se incorporarán a las aguas subterráneas.

Esto debería también hacernos reflexionar sobre el tema de los "males mayores y menores". Por ejemplo, si un suelo está contaminado con metales esto puede ser analizado desde una doble perspectiva, en plan *"oh que desgracia que el suelo esté contaminado"*, u *"oh que bien que los contaminantes no pasaron al sistema de aguas subterráneas"*. Como podrá uno imaginar, si el suelo va a ser destinado a la agricultura, pues sí, es una desgracia. Pero si pensamos en las agua de pozo destinadas en muchos lugares del mundo para consumo humano, entonces quizás no sea una mala noticia. Por cierto, que esto no lleve a engaño, el que un suelo esté contaminado con metales pesados no significa (necesariamente) que una parte de estos no haya pasado a las aguas subterráneas. Para llegar a esta conclusión, primero deberíamos realizar un análisis químico de las aguas. En ausencia de los medios o la imposibilidad material de llevar a cabo análisis químicos de las aguas (p.ej., se han agotado los fondos de la investigación; se carece del instrumental para analizar aguas), la composición de los suelos y su substrato de rocas puede darnos valiosas pistas. Por ejemplo, si el suelo es carbonatado o arcilloso rico en esmectita, entonces es muy probable que los metales, efectivamente, hayan sido retenidos.

Esto nos lleva a otro tema importante en los suelos, el concepto de acidez y alcalinidad.



Explotación agrícola sobre suelos fuertemente contaminados con plomo en el lado sur del Cabezo Rajao (ver Navarro et al., 2008), Distrito Minero de La Unión (Murcia, España). A diferencia de otros suelos del distrito, estos no son carbonatados y de hecho son más bien arenosos, con lo cual tenemos "dos" problemas, fácil migración de contaminantes hacia abajo una vez disueltos y cultivo de hortalizas en el suelo contaminado.

El término "reacción de un suelo" expresa las condiciones de alcalinidad o acidez de un suelo, es decir, representa las condiciones de pH del mismo. Durante las etapas iniciales de formación de un suelo el agua de lluvia (ligeramente ácida) provoca la alteración de algunos silicatos primarios (feldespatos, anfíboles, olivinos, etc.) por hidrólisis, liberándose como especies catiónicas los metales presentes en ellos. De esta manera los cationes más abundantes son K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, etc., siendo estos las primeras bases que se liberan en forma de hidróxidos. Esto es así porque se produce un empobrecimiento en H^+ (por consumo durante la hidrólisis) y un enriquecimiento relativo en OH^-, lo cual significa que el pH va tomando valores más altos. En menor medida aparecen hidróxidos de hierro y aluminio, que quedan precipitados y en forma inactiva. Aunque en los procesos de humificación se van generando una serie de compuestos de carácter ácido, el balance neto en las etapas iniciales será hacia condiciones de mayor alcalinidad.

En las etapas posteriores de la evolución del suelo las bases pueden ser absorbidas por las plantas, pueden ser lavadas o pueden quedar retenidas en los complejos de cambio. El lavado afecta primero con mayor intensidad a aquellos metales de mayor solubilidad como son los alcalinos (Na, K) y luego a los alcalinotérreos (Ca, Mg). La pérdida de bases produce un fuerte descenso del pH y por eso los suelos muy evolucionados tienden a ser ácidos

Los factores y procesos que controlan la acidez del suelo son la alteración mineral, la humificación (ya vistos anteriormente) y el clima:

- Los climas húmedos favorecen la formación de arcillas de baja actividad (baja adsorción catiónica) como la caolinita y se genera una percolación acusada de agua, por tanto se generan suelos ácidos. A esto hay que sumar el mayor desarrollo de vegetación (materia orgánica) y por lo tanto la aparición de ácidos húmicos.
- Los climas secos favorecen la formación de arcillas de gran actividad (esmectitas) y hay una menor percolación de agua (y menos agua en general), por tanto, tienden a formarse suelos neutros a alcalinos

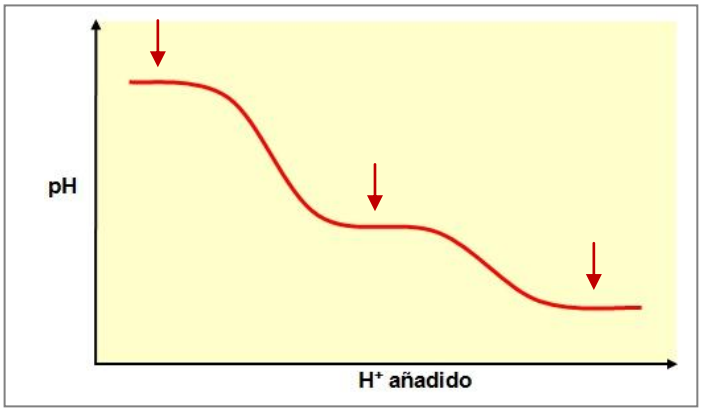
Aquí debemos considerar distintos tipos de acidez:

- La acidez activa o puntual, que está condicionada por la concentración de hidrogeniones ($[H^+]$) libres en equilibrio en el agua del suelo.
- La acidez de intercambio o potencial, que viene dada por los hidrogeniones en las sedes de intercambio.
- La acidez total, que es la suma de la acidez activa y la acidez de intercambio.

En los suelos naturales, el intervalo de valores de pH se extiende desde 3 (suelos ácidos) a 12 (suelos alcalinos). El pH óptimo para cultivos en regiones húmedas templadas está entre 5 y 7. Los suelos calcáreos en regiones áridas están dominados por la presencia de Ca, Mg, K, y Na, y presentan un pH de 7,0 a 8,5. Los suelos en regiones húmedas con cubierta vegetal tienen un rango de pH de 3,5 a 5,8 siendo los cationes predominantes Al^{3+}, $Al(OH)_x$ y H^+.

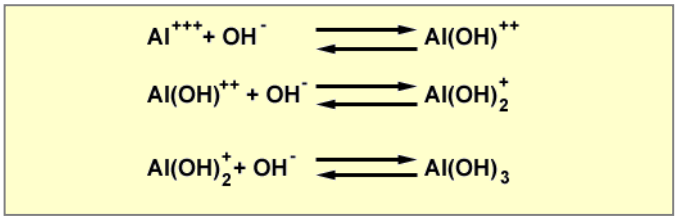
El suelo tiene cierta capacidad amortiguadora (poder tampón del suelo) de las variaciones del pH. El comportamiento amortiguador de un suelo al variar el pH se observa en la curva de neutralización. Esa curva no es regular, presentando rellanos de estabilización de pH, es decir, a determinados rangos o valores de pH, el sistema está tamponado. En esos rangos, el pH del suelo no varía o varía muy poco independientemente de la adición de ácidos o bases.

En medios cercanos a la neutralidad, la función amortiguadora es ejercida por el complejo de cambio del suelo. Los excesos de acidez se compensan por el intercambio de las bases del complejo por los hidrogeniones de la solución, mientras que los excesos de alcalinidad son compensados por el intercambio de hidrogeniones del complejo por bases de la solución.

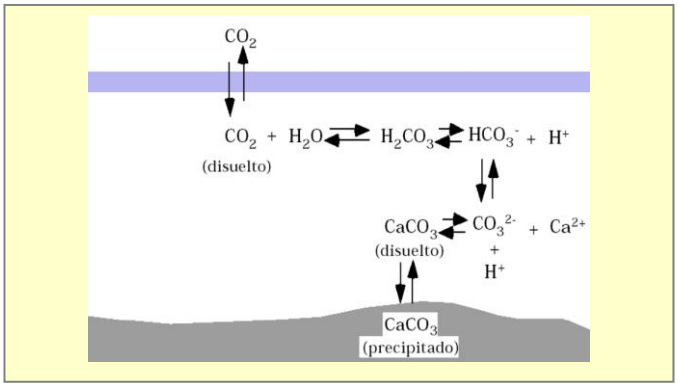


Rellanos de estabilización del pH donde el suelo tampona las soluciones (flechas).

En medios ácidos las bases están prácticamente ausentes y en el complejo de cambio solo existen hidrogeniones. El aluminio que a esos valores es soluble se encuentra disociado. Este aluminio presenta una capacidad tampón debido a que puede formar iones con diferente grado de hidratación y diferente carga positiva. El exceso de hidroxilos (OH^-) va siendo captado por los iones de aluminio que modifican su estado, lo que hace que desaparezcan de la solución y el pH permanezca invariable:



En medios alcalinos, cercanos a 8,5, el calcio de la solución se encuentra en parte en forma de carbonato. Una adición de bases provocaría la precipitación del carbonato cálcico a expensas del bicarbonato de la solución. Así, los suelos calcáreos están tamponados y nunca exceden ese pH:



Tamponamiento (buffering) en suelos carbonatados.

3.2.5 Suelos y minería o el problema de la cuadratura del círculo

Tres famosos problemas de construcción que datan de la época griega se resistieron al esfuerzo de muchas generaciones de matemáticos que intentaron resolverlos: la duplicación del cubo (construir un cubo de volumen doble al de un determinado cubo), la cuadratura del círculo (construir un cuadrado con área igual a un círculo determinado) y la trisección del ángulo (dividir un ángulo dado en tres partes iguales). Ninguna de estas construcciones es posible con la regla y el compás, y la imposibilidad de la cuadratura del círculo no fue finalmente demostrada hasta 1882 (Profesor en Línea, 2011).

¿Cómo preservar los suelos y mantener la actividad minera? Aquí es donde se entra en el terreno del famoso problema de la cuadratura del círculo, y no hace falta que esperemos siglos para que alguien demuestre la imposibilidad de resolverlo. Podemos minimizar los impactos, pero por definición cualquier actividad minera perturbará "más" o "menos" los suelos. Dicen (y con razón) que *mal de muchos consuelo de tontos*, pero la verdad es que, por otra parte, "ninguna" actividad humana es "inocua" para los suelos. El problema radica en que no nos percatamos de ese hecho.



Edificios "aplastando" suelos (un par de ejemplos). A la izquierda, el de la US Environmental Protection Agency (US EPA) en Denver (Colorado); a la derecha, el edificio de Greenpeace en Amsterdam (imágenes[39,40]).

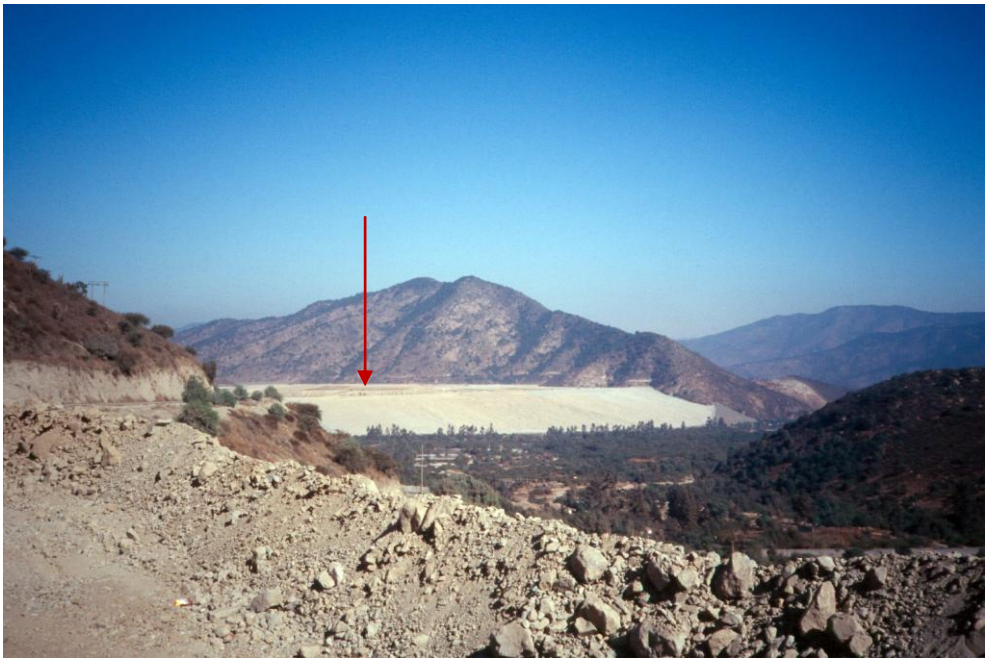
Decimos esto porque el ser humano tiene la infinita capacidad para cargar con todas las culpas del mundo a individuos específicos, grupos o instituciones. Nadie va a negar el nefasto papel que ha tenido la minería en muchos lugares del mundo, pero si esto es verdad, no lo es menos que con gozo y satisfacción, algunos observan como las ciudades o el campo cultivado se expanden. Lo gracioso del tema (si es que tiene alguna gracia), es que a esto le llamamos "progreso" mientras que a la minería la denostamos como culpable de al menos parte de los males de la humanidad habidos y por haber. Todo esto sin mencionar que si quitamos la minería de la ecuación no hay ciudades, y el campo retrocedería (al menos) un milenio en prácticas agrícolas. En otras palabras, los supervivientes de un mundo sin minería malvivirían en chozas, y decimos "supervivientes" porque el campo, sin las modernas prácticas que requieren el uso de fertilizantes industriales en grandes cantidades, sería incapaz de alimentar a una población mundial como la actual. La agricultura orgánica está bien para quien quiera vender melocotones (*duraznos*) con un fuerte *plus* en el precio, y para que las generaciones *postmodernas* se sientan felices pagando más por esos melocotones. Eso es una cosa (*a cada cual lo suyo*), pero de ahí a insinuar públicamente que la agricultura

orgánica pueda alimentar a la humanidad, a los miles de millones que somos ahora, es un comentario ignorante o mal intencionado. De la misma manera es de ignorantes llamar "orgánica" a esta agricultura porque la otra ¿qué es entonces? ¿inorgánica? Si no hablamos un idioma en propiedad difícilmente podremos pensar de la misma manera.

Dicho todo esto, analizaremos a continuación cómo la minería impacta los suelos. En el capítulo siguiente estudiaremos las metodologías de minimización de daños, por lo que aquí nos centraremos en las vías y mecanismos de contaminación. Analizaremos los potenciales impactos de la minería metálica, que es la que con mucha diferencia genera los mayores problemas ambientales.

La minería puede impactar los suelos de dos maneras, normalmente combinadas:

1. De forma física, haciendo desaparecer los suelos por las excavaciones. Aplastando y compactando los suelos por efectos de los ingentes volúmenes de residuos mineros. A través de la construcción de infraestructuras tales como edificios para plantas de tratamiento de minerales, edificios de oficinas, y una red de vías de transporte para tráfico rodado.
2. De manera química, ya que los principales minerales que contienen los metales de interés económico son sulfuros, y los sulfuros se oxidan liberando su carga metálica en solución (drenaje ácido). Aquí regresamos a los residuos mineros, que no solo ejercen una presión física sobre los suelos, sino que además pueden originar soluciones químicas que transportan metales pesados, que por descenso llegarán hasta los suelos.



Balsa (relave) de la mina El Soldado (Chile), ocupando un valle y sus suelos.

Añadamos a esto que los impactos pueden ser "locales" (o relativamente locales), como los vistos en la balsa de El Soldado, o "externos", como por ejemplo con el humo rico en SO_2 de una fundición de sulfuros (inductor de la lluvia ácida que caerá sobre los suelos) más el particulado arsenical que pueda contener (que descenderá y se incorporará a los suelos).

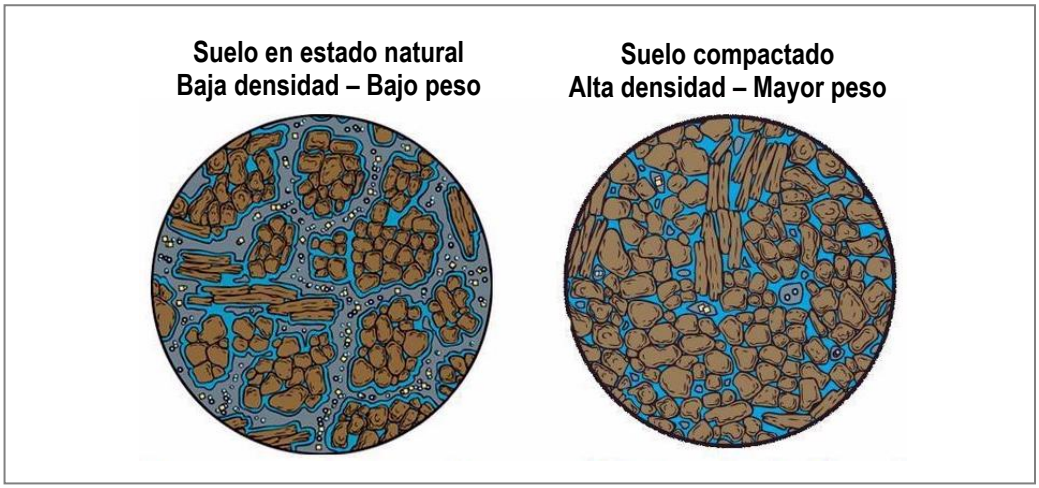
Pero regresemos al comienzo con la compactación de suelos. Puede que realizar actividades agrícolas sobre un suelo que ha estado soportando una escombrera de minerales o una balsa no sea la mejor la idea del mundo. Sin embargo, si la actividad minera estuvo centrada en minerales inocuos para el medio como son las arcillas, entonces, una vez removidas las escombreras y otros residuos, el suelo "podría" ser reutilizable para otros propósitos que incluyen el agrícola. El problema radica aquí en que los suelos son compactables en menor o mayor grado, y que si esto ocurre, entonces disminuye su porosidad y por lo tanto el agua no entrará o se moverá con gran dificultad. Tenemos que pensar además que la vida que alberga un suelo (y que resulta clave para las prácticas agrícolas) tampoco podrá desarrollarse con normalidad en ese medio alterado. Resumiendo, la compactación del suelo es un problema que restringe el crecimiento de las raíces de las plantas, el movimiento del agua y la absorción de nutrientes, lo que resulta en una reducción del rendimiento (Weil y Chen, 2009).

What is Soil Compaction and When is it a Problem

Soil compaction occurs when moist or wet soil aggregates are pressed together and the pore space between them is reduced. Compaction changes soil structure, reduces the size and continuity of pores, and increases soil density (bulk density). Wheel traffic or pressure (weight per unit area) exerted on the soil surface by large animals, vehicles, and people can cause soil compaction. In areas of rangeland, compacted soil layers are generally at the soil surface or less than 6 inches below the surface, although they can be as deep as 2 feet under heavily used tracks and roads. Increases in density can be small to large.

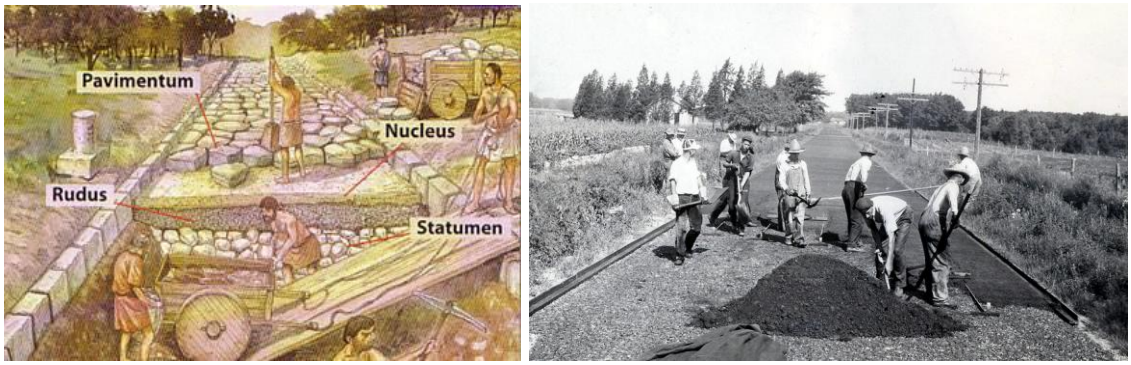
Compaction changes several structural characteristics and functions of the soil. It is a problem when the increased soil density and the decreased pore space limit water infiltration, percolation, and storage; plant growth; or nutrient cycling.

EcoMerge (2010)



Diferencias entre un suelo en estado natural y otro compactado (imagen[41]).

Sobre la construcción de pistas para tráfico rodado, poco que agregar, un fenómeno perturbador de los suelos desde la época romana cuando se construyeron las primeras carreteras.



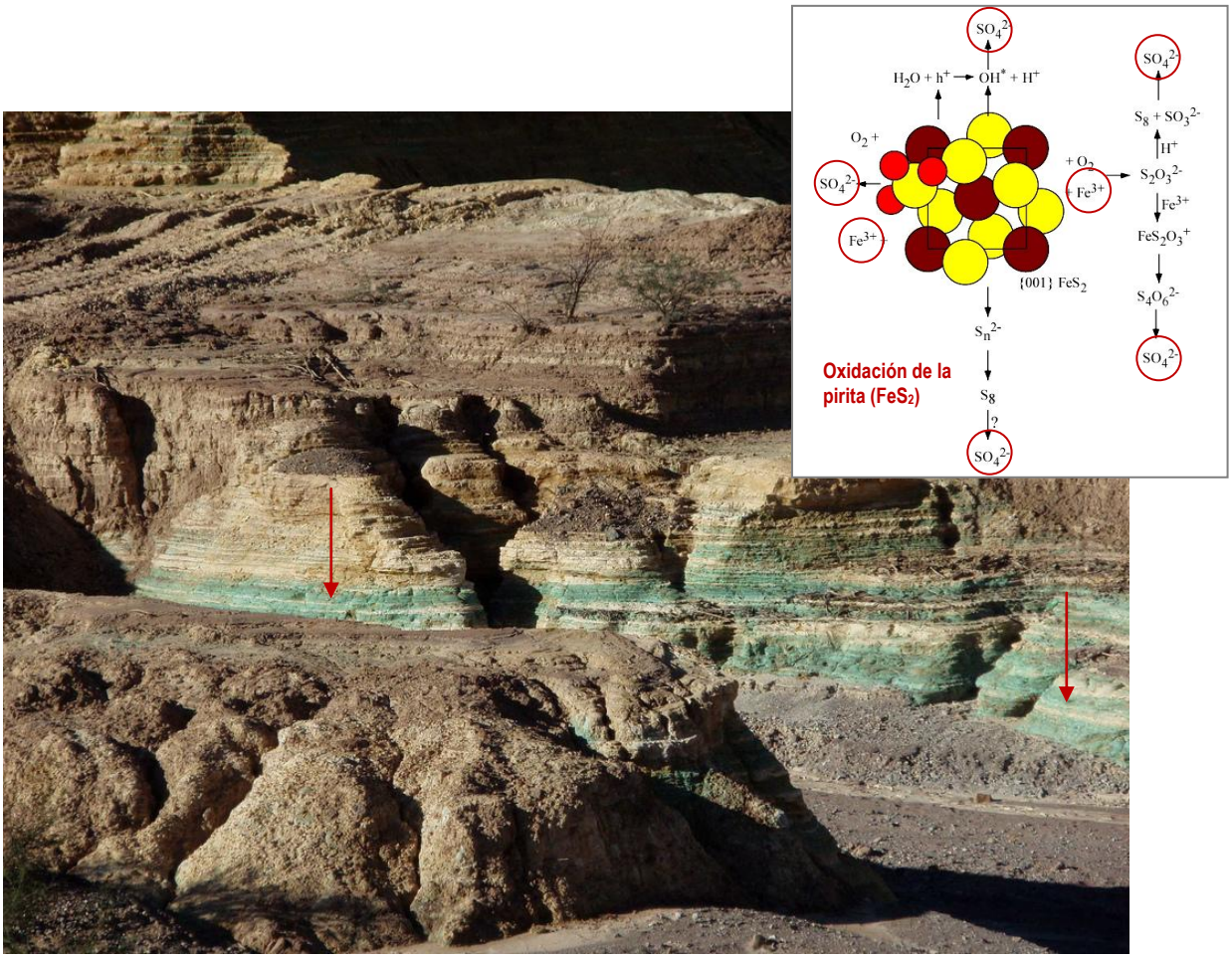
Construcción de una vía romana y una carretera en Estados Unidos en 1929. No se apreciaban grandes cambios dos milenios después (imágenes[42,43]).

En lo que respecta a las labores de construcción de edificios para la actividad minera, estos pueden ocupar grandes espacios y destruir suelo y vegetación en zonas particularmente sensibles como la selva tropical. Casos de estos han sido particularmente significativos en la Isla de Nueva Guinea, e implican la remoción de los suelos y por tanto de la cobertura vegetal.



Labores de construcción de infraestructuras para la mina oro Hidden Valley, en Papúa Nueva Guinea. La montaña ha sido deforestada y su parte superior "cortada" y "aplanada" (imagen[44]).

Por su parte, los impactos químicos sobre los suelos pueden ser de gran importancia y muy difíciles de remediar. Como indicábamos al comienzo, estos comienzan la mayor parte de las veces con la oxidación y lixiviación de metales a partir de las especies sulfuradas presentes en escombreras y balsas (ver apartado *2.1.2*). El proceso de reacciones se origina con la oxidación de la pirita, que generará ácido sulfúrico y Fe^{3+} para oxidar activamente a los otros sulfuros presentes en una balsa o escombrera:



Procesos de oxidación de minerales de cobre en una balsa (color verde), lo que muestra que al menos parte del metal ha sido puesto en solución; Nacozari de Garcia, Sonora, Mexico; recuadro, oxidación de la pirita, a lo largo de un plano 001 (imagenes[45,46]). Es probable que sulfuros de cobre tipo calcopirita hayan reaccionado con el sulfato férrico derivado de la oxidación de la pirita, dando origen a sulfato de cobre: $CuFeS_2 + 2Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow CuSO_4$ *(verde)* $+ 5FeSO_4 + 2S$.

La intensidad del fenómeno de oxidación-lixiviación dependerá de tres factores principales (Oyarzún y Oyarzun, 2011):

- La proporción entre la pirita y otros sulfuros, mientras más elevada sea esta, mayor será la producción de ácido y la lixiviación de metales. Este es un problema real en las escombreras o balsas (relaves), ya que ahí la pirita será con mucha diferencia el sulfuro más abundante.

- El tipo de roca, no es lo mismo una roca tipo pizarra o cuarcita, que una volcánica feldespática o una caliza. Si existen minerales reactivos al ácido, como los feldespatos o carbonatos, el ácido reaccionará con estos (hidrólisis) y la solución se neutralizará en mayor o menor proporción, rebajándose la capacidad de lixiviación:

  $$\underset{\text{Feldespato}}{3KAlSi_3O_8} + 2H^+ \rightarrow \underset{\text{Sericita}}{KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2} + 6SiO_2 + 2K^+$$

  $$\underset{\text{Sericita}}{2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2} + 2H^+ + 3H_2O \rightarrow \underset{\text{Caolinita}}{3Al_2Si_2O_5(OH)_4} + 2K^+$$

  $$\underset{\text{Sericita}}{KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2} + 4H^+ + 2(SO_4)^{2-} \rightarrow \underset{\text{Alunita}}{KAl_3(SO_4)_2(OH)_6} + 3SiO_2$$

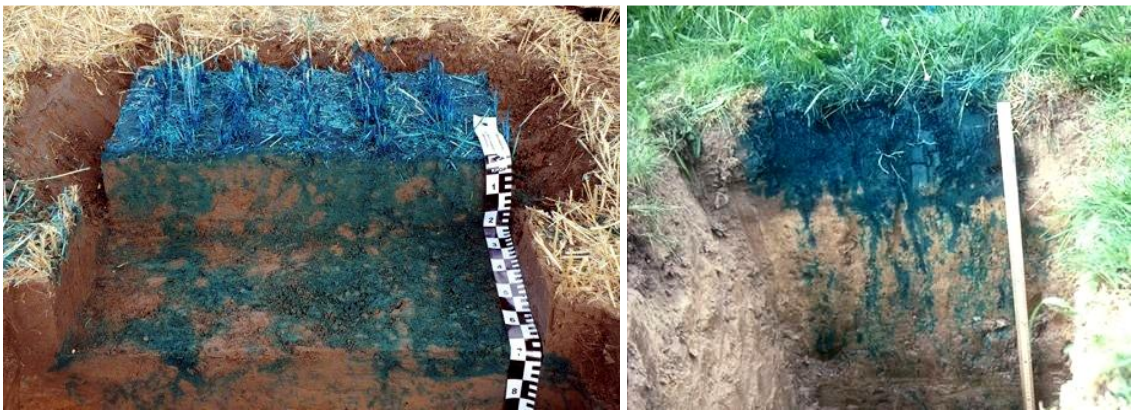
  Al reaccionar el ácido con el feldespato se produce una hidrólisis donde el producto intermedio es la sericita y el final es caolinita. Como puede observarse, el proceso consume hidrogeniones (H^+). Si hay suficiente sulfato disponible, además se podrá formar alunita.

  En el caso de los carbonatos, la reacción de consumo de ácido puede simplificarse de la siguiente manera:

  $$CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

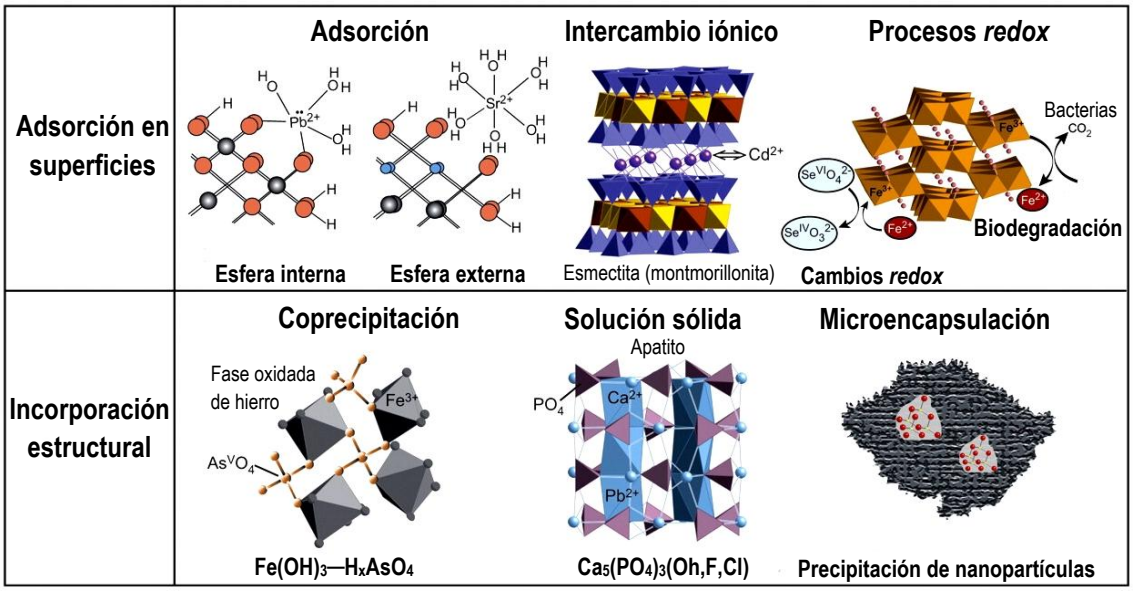
- El clima, un clima cálido acelera las reacciones, uno frío las ralentiza; grandes precipitaciones generan dilución de las soluciones, mientras que lluvias moderadas (por ejemplo en el clima Mediterráneo) generan las condiciones perfectas para generar una mayor acidez y transporte de metales.

En un clima lluvioso las escombreras o balsas generarán mayor movimiento de soluciones descendentes hacia los suelos que la sostienen. Una vez ahí, los contaminantes avanzarán progresivamente por el suelo en su camino hacia abajo (ver figura inferior).



Pruebas de infiltración de soluciones en suelos utilizando una tintura azul como marcador. Imágenes: Kodešová et al. (2010) y NRCCA (2010).

Queremos insistir en la fisicoquímica de los procesos como clave para entender la movilización de metales y metaloides. Lo primero a considerar es el medio, si hablamos de suelos carbonatados una solución ácida (por lo tanto con capacidad de transporte de metales) se neutralizará, y por lo tanto los metales quedarán retenidos en la fracción carbonatada. Lo mismo se aplica a los suelos ricos en arcillas del tipo montmorillonita (esmectita), con gran capacidad de intercambio iónico y huecos entre capas como para acomodar metales. Los compuestos orgánicos también tienen la capacidad de retener metales formando compuestos organometálicos. Por último tenemos algunos óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso que pueden adsorber metales y metaloides o incorporarlos en estructuras tipo túnel. De particular importancia en este último apartado es la fijación de arsénico por fases minerales oxidadas de hierro como la goethita. Algunos ejemplos de estos mecanismos se muestran en la figura inferior.



Mecanismos de retención de especies metálicas y algún metaloide como el arsénico por las fases minerales del suelo. Adaptada de O'Day y Vlassopoulos (2010).

Por otra parte, la textura del suelo también juega un papel importante. Por ejemplo, mientras más poroso y menos reactivo sea un suelo, más dejará pasar los contaminantes. El grado extremo de este fenómeno estaría ilustrado por un suelo arenoso constituido por granos gruesos de cuarzo. Por el contrario, los suelos de porosidad reducida tenderán a retener más tiempo los contaminantes, aumentando las posibilidades de que estos se fijen a superficies minerales o entren en estos por intercambio iónico o incorporación estructural.

Por último, debemos hacer mención a dos clases de suelos típicos de las zonas mineras. La primera a destacar es la de los "antrosoles", que son suelos que se han formado o modificado profundamente a través de las actividades humanas. Los antrosoles son los suelos que típicamente conforman el área minera propiamente tal.



Antrosoles en el Grupo Minero San Quintín (Ciudad Real, España). No importa cuán vegetados estén los suelos donde hubo actividad minera (imágenes superiores) porque una rápida inspección del lugar mostrará que se trata de estructuras edáficas artificiales o tan profundamente modificadas que no quedan casi vestigios del suelo inicial (imágenes inferiores).

Por otro lado tenemos los llamados "tecnosoles" (Rossiter 2005), es decir, depósitos de origen artificial y muy jóvenes (menos de cien años de edad), como algunos residuos mineros, que sin embargo pueden haber desarrollado importantes comunidades de plantas silvestres en su superficie (Oyarzun et al., 2009). En esta categoría pueden entrar por ejemplo algunas balsas consolidadas e incorporadas al paisaje local.

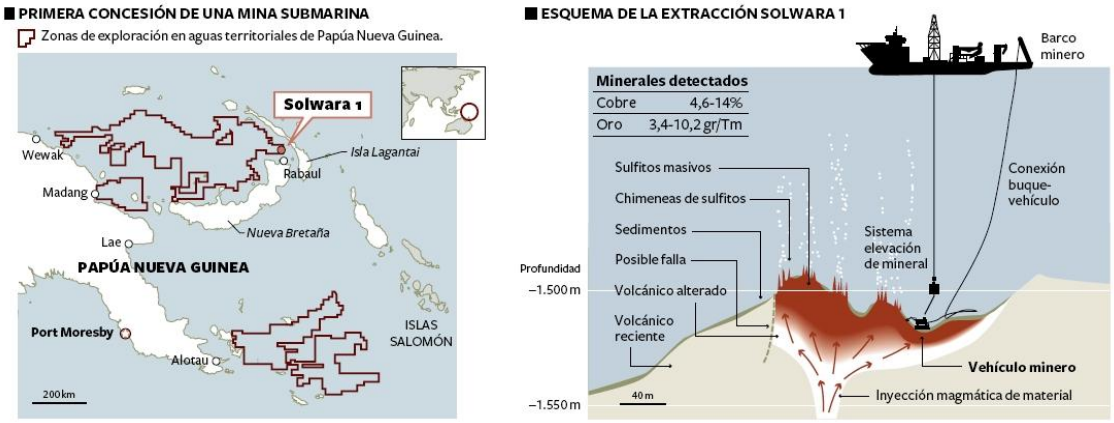


Tecnosol formado a partir de la balsa de residuos de cianuración de la antigua planta de tratamiento de minerales de Rodalquilar (Almería, España). El tecnosol de color rosa que se aprecia en la imagen es extremadamente rico en arsénico (Oyarzun et al., 2009).

3.3 Aguas, un medio receptor e inductor de impactos

3.3.1. Una introducción al tema

Se suele pensar en las aguas como receptoras de la contaminación pero poco como transportadoras o vector de la misma. Es el equivalente a una persona sana que habiendo enfermado puede transmitir la enfermedad a otros. Al igual que el aire, tratado en la primera sección de este capítulo, las aguas pueden transportar la contaminación a lo largo de grandes distancias ya sea en cursos superficiales como los ríos o en su movimiento subterráneo. Lo mismo se aplica a los mares, cuando por ejemplo ocurre un fenómeno de contaminación costa-afuera (p.ej., vertido de petróleo) y las corrientes arrastran los contaminantes hacia las costas. Al respecto, con el advenimiento de la minería submarina *ad portas*, el riesgo de dispersión de contaminantes mineros en los océanos aparece nítidamente en el horizonte.



Propuesta para la explotación submarina de recursos de cobre y oro en las aguas de Papúa Nueva Guinea (Méndez, 2010)

Pero el papel que juegan las aguas puede ir más allá de lo mencionado, pudiendo además actuar como "inductoras" de un proceso de contaminación.



Izquierda, inundación y erosión catastrófica (flecha) en la mina de carbón de Yallourn (Australia); derecha, marcas de erosión hídrica (flecha) en la balsa de una explotación de minerales de uranio (Wyoming) (imágenes[47,48]).

Así la combinación de una topografía adversa (montañas o tierras sin elevación como una llanura de inundación) con fenómenos climáticos catastróficos (como los que podemos esperar en regiones tropicales o zonas del planeta afectadas por El Niño) provoca que las aguas puedan inducir graves problemas en las zonas mineras. Dos condiciones agravan el problema:

1. La existencia de acopios de residuos removibles por la fuerza de las aguas.
2. La existencia de balsas o estanques con soluciones ácidas o cianuradas que puedan desbordarse.

Un ejemplo recurrente de estas situaciones límites, que hemos tratado y trataremos más veces en esta obra, es el de la Isla de Papúa Nueva Guinea y sus minas de cobre-oro en altura tales como Grasberg u Ok Tedi. Las imágenes siguientes son lo suficientemente ilustrativas.

Ok Tedi Environment - Impacts

In Chile, where the largest copper mines of the world are operated, waste is just set aside, and will remain in a desert climate for a long time. On New Guinea, the situation is more difficult. Tropical rainfall may wash away any disposals, if not confined by a dam or in a deposit, that is built and maintained as a building. The government of PNG imposed to build a tailings reservoir, and OTML started the construction of a dam south of the mine. However, a landslide damaged the foundation of the dam in 1984. Considering the impact of a sudden burst of the dam, caused by landslide or earthquake, the plan of a tailings dam was dropped without any alternative. PNG government, overriding the advice of its technical staff (see "Smoking Gun Files"), set levels of pollution, that allowed OTML to discharge tailings without any treatment.

On the upper Ok Tedi, coarse rock and sand aggraded the river bed. Ok Mani and Sulphide Creek, just below the dead rock dumpsite, are elevated 50 - 80 m. The Ok Tedi at Tabubil has a river bed elevated 10 - 20 m. Miners never miss an occasion, to mention the landslides in the mountain areas, that may fill a river bed in an instant. However, the singular landslides must not be compared to the steady dumping of mine waste. River bed and floodplain are never given a break by the mine to recover. The landslide soil and rock is different in composition from mine waste. No comparable impacts of landslides at other rivers are observed, like an aggradation of the Upper Ok Tedi in the course of 90 km, and a massive forest die back in the floodplain for another 100 km of the Lower Ok Tedi.

Save the Elbe (2003)



A la izquierda el Río Ok Tedi con fenómenos de colmatación masiva debido a las labores mineras en el yacimiento del mismo nombre; a la derecha, tal como debería ser el entorno del río por comparación con otro cercano (Kvirok River). Imágenes de Save the Elbe (2003).

Remoción en masa de residuos mineros contaminantes, colmatación de los cursos fluviales, y estos son casi los "menores" problemas que se pueden plantear, porque resta por mencionar de manera rápida los fenómenos de drenaje ácido y las consecuencias de la presencia de metales pesados (o compuestos de los mismos) en las aguas.



Drenaje ácido derivado de una mina rica en sulfuros de cobre y níquel (imagen[49]).

El caso del incidente de la Bahía de Minamata en Japón es mundialmente conocido (Ministry of the Environment, 2011). Allí una fábrica expulsó metilmercurio durante años a la bahía, compuesto mercurial de elevada toxicidad. El metilmercurio entró en la cadena trófica (peces en este caso), de ahí fue a parar a los habitantes de la bahía que consumían esos peces y el resto es historia. Siendo un compuesto mercurial particularmente peligroso durante los embarazos, el resultado final fueron múltiples nacimientos de bebés con deformaciones. Pero el caso de Minamata no es el único, y otro famoso, esta vez por cadmio, también nos llega de Japón. Hablamos de la enfermedad "Itai Itai" (Chemie.de, 2011) que se originó debido a la contaminación minera de un río que era utilizado para la irrigación de los arrozales y para beber. En las siguientes páginas analizaremos

Itai-itai disease

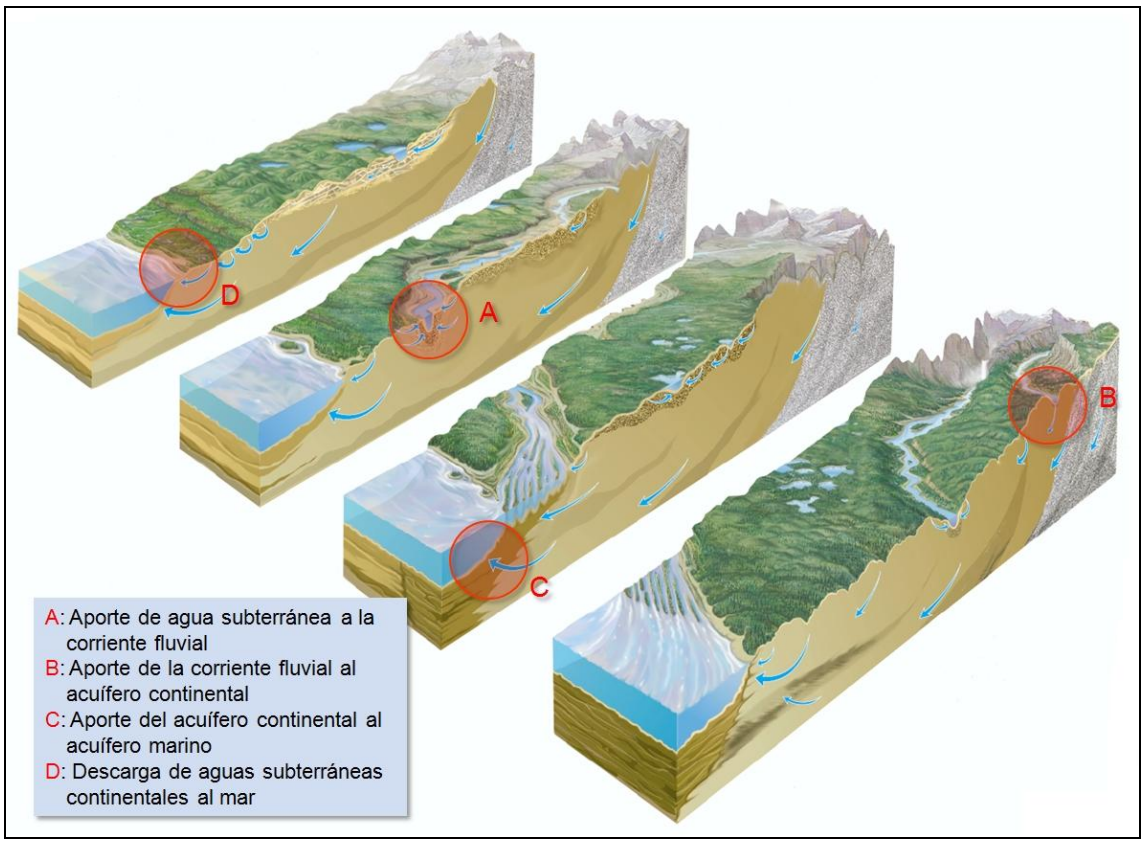
Itai-itai disease was caused by cadmium poisoning due to mining in Toyama Prefecture. The earliest records of mining for gold in the area date back to 710. Regular mining for silver started in 1589, and soon thereafter, mining for lead, copper, and zinc began. Increased demand for raw materials during the Russo-Japanese War and World War I, as well as new mining technologies from Europe, increased the output of the mines, putting the Kamioka Mines in Toyama among the world's top mines. Production increased even more before World War II. Starting in 1910 and continuing through 1945, cadmium was released in significant quantities by mining operations, and the disease first appeared around 1912. Prior to World War II the mining, controlled by the Mitsui Mining and Smelting Co., Ltd., increased to satisfy the wartime demand. This subsequently increased the pollution of the Jinzu River and its tributaries. The river was used mainly for irrigation of rice fields, but also for drinking water, washing, fishing, and other uses by downstream populations.

Chemie.de (2011)

más de cerca la problemática de la contaminación de la aguas de superficie y subterráneas.

3.3.2 Alteraciones en las condiciones hidráulicas, erosión, colmatación y otros procesos

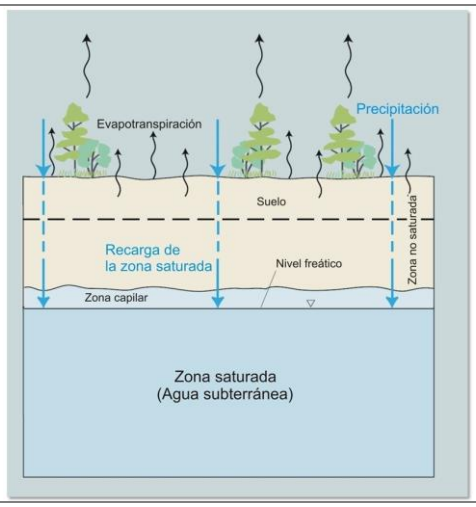
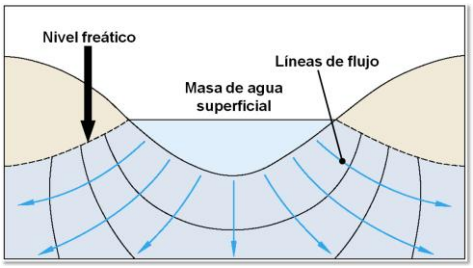
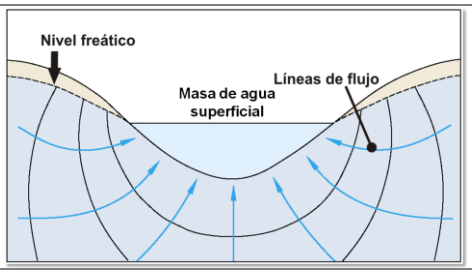
Es importante que en el análisis de los efectos derivados de la actividad minera en las aguas, y por tanto en los recursos hídricos, se parta de una premisa fundamental que es considerar las aguas superficiales y subterráneas como un único recurso. Esto debe ser así ya que una afección negativa sobre cualquiera de estas acabará indefectiblemente generando a su vez unos efectos negativos sobre las otras (Winter et al., 1998).



Relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas (Modificado de Winter et al., 1998).

Las aguas subterráneas de los acuíferos son recargadas por la precipitación que se infiltra a través del suelo y la zona no saturada, y también por el agua que se infiltra desde los lechos de los ríos, lagos, y embalses. Pero a su vez las masas de agua superficiales pueden ser también alimentadas por los acuíferos. Se establecen así una serie de relaciones que están muy condicionadas por factores geológicos, climáticos, topográficos y por supuesto antrópicos, que existen en el área.

Estas relaciones pueden perturbarse en el tiempo dependiendo de la evolución de los factores arriba mencionados, los cuales condicionarán la vulnerabilidad del recurso, su degradación y pérdida.

Recarga del acuífero (zona saturada) por percolación del agua de precipitación a través de la zona no saturada (zona vadosa)	
Recarga del acuífero desde una masa de agua superficial (río, lago, embalse, balsa)	
Descarga del acuífero a una masa de agua superficial (río, lago, embalse)	

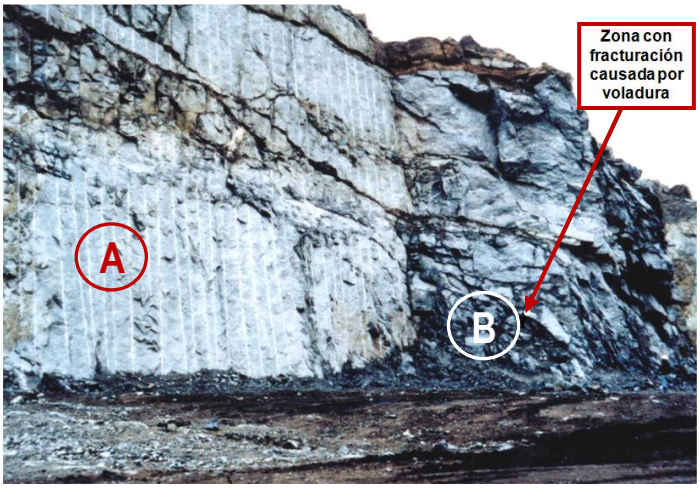
Recarga por infiltración a través de la zona no saturada y relaciones entre las masas de aguas continentales (Modificado de Winter et al., 1998).

La actividad minera provoca una serie de impactos, tanto directos como indirectos, en las condiciones físicas iniciales de las aguas, que incluyen desde los más obvios como son los de descensos de niveles o desvío de cauces hasta otros quizás menos evidentes pero no por ello menos importantes como por ejemplo: a) la alteración en la tasa de entrada de agua en el acuífero (recarga); o b) la variación en la facilidad con la que el agua fluye a través del acuífero (lo que se conoce como conductividad hidráulica). Así, la alteración en las condiciones hidráulicas se asocia a una variación en los gradientes energéticos del agua, causada principalmente por la interposición de barreras, la modificación de perfiles fluviales y niveles de base locales, y la generación de conductos y huecos. En otras palabras, el balance energético inicial es modificado como consecuencia de:

1. *La construcción de barreras*, considerando no solo los diques o presas proyectados con esa función específica sino también cualquier otra acumulación de material (p.ej., escombreras, rellenos, colmataciones) o modificación en las propiedades hidráulicas del material original (p.ej., compactación, cementación) que suponga un obstáculo para la circulación del agua.
2. *La alteración de perfiles y niveles de base en cursos fluviales* causados por desvíos de cauces, represamientos y embalsamientos, y excavaciones. La instalación de barreras de cierta entidad supone en muchos casos la alteración del perfil del río y la formación de un nivel de base local.
3. *La formación de conductos y huecos*, en este caso y al contrario que las barreras se consideran todos aquellos fenómenos que generan la formación de poros y huecos que faciliten o favorezcan el flujo del agua, incluyendo túneles, galerías, fracturación inducida por voladuras, disolución, etc.
4. *La variación en el propio volumen (reservas) de agua* como consecuencia de la extracción, acumulación o inyección.



A la izquierda, efecto barrera en la escorrentía superficial provocado por una escombrera en la mina Chunnimol (Rivona, India) (imagen[50]); a la derecha alteración de perfiles y niveles de base por acumulación de lodos de antiguas balsas mineras ocupando el fondo de valle (Cerro de San Cristóbal, Distrito Minero de Mazarrón, España).



Comparación entre una zona de un macizo rocoso gnéisico con discontinuidades pre-voladura (A) con otra afectada por roturas de voladura (B), donde se ha incrementado la permeabilidad por las fracturas generadas (imagen[51]).

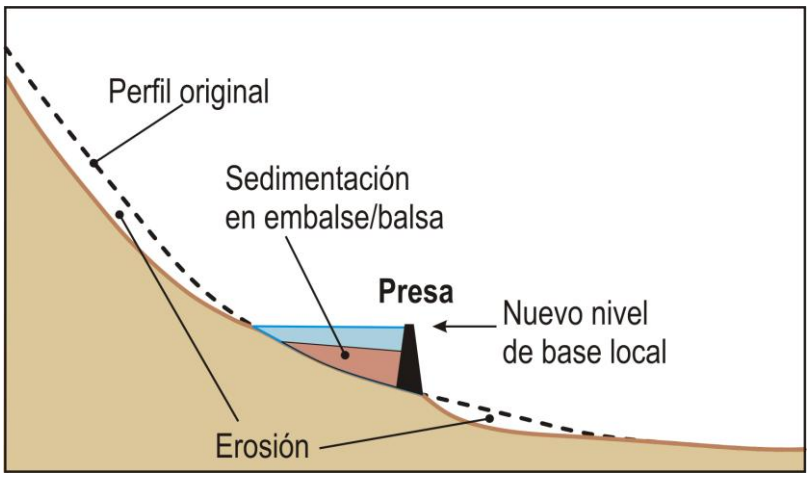
Así, las alteraciones de las condiciones hidráulicas se pueden ejercer directamente sobre el agua, sobre el medio por donde esta fluye o circula, o en algunos casos sobre ambos. Sin embargo, lo realmente importante es considerar que esas modificaciones de las condiciones iniciales conllevan en la mayoría de los casos otros efectos ambientales secundarios que pueden ser de gran importancia, sobre todo si tienen lugar en un medio muy reactivo desde el punto de vista químico. No hay que olvidar que el agua es el principal agente responsable de la alteración química de minerales y del transporte de los componentes liberados en ella, tanto en coloides y partículas, como en especies en disolución.

Surface mining effects on runoff ¿can the original conditions get back?

... large-scale surface mining can remove from the landscape geomorphology features which formerly played important roles as source areas for surface runoff. No artificial dewatering regime is likely to emulate the temporal behaviour of such natural features. Consequently, where surface mining removes such features, significant alterations in the runoff behaviour of downstream watercourses can be confidently expected. Similarly, once restoration of surface mines is complete, back-fill is likely to behave very differently to natural soils in terms of runoff generation.

Younger et al. (2002)

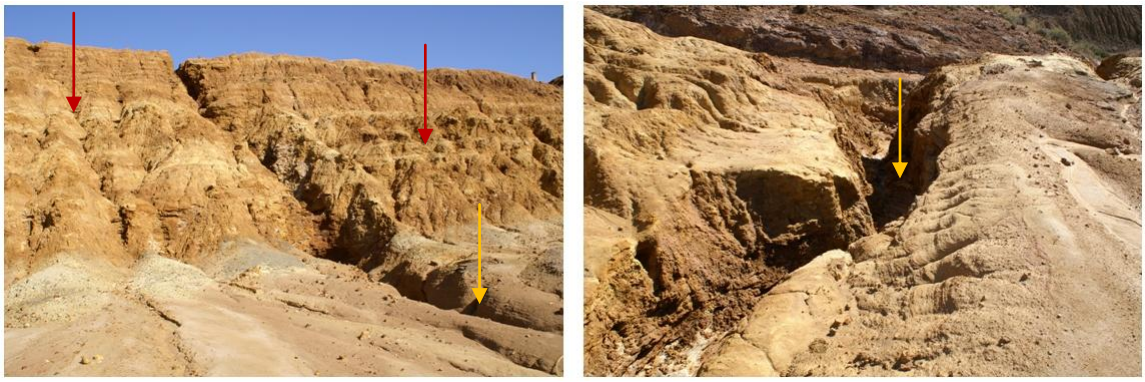
Las alteraciones en los cursos fluviales generan la modificación del perfil original y la implantación o modificación de los niveles de base locales, alterándose de esta manera el balance entre la tasa de erosión y las tasas de sedimentación aguas abajo y aguas arriba de donde se ha producido la alteración del curso. Uno de los casos más frecuentes son los embalsamientos relacionados con la construcción de presas o la instalación de balsas. Estos dan lugar a nuevas zonas de erosión (por ejemplo, erosión remontante) y nuevas zonas de sedimentación en el cauce, incluyendo la acumulación de material derivado de la propia explotación minera con un alto contenido en metales en el propio represamiento. La erosión aguas arriba puede a su vez causar abarrancamientos, aumentando la carga sólida arrastrada por la corriente.



Efectos de erosión/sedimentación provocados por un represamiento en un cauce fluvial durante la actividad minera. Nótese que con ello se genera la acumulación de materiales químicamente reactivos sobre el curso de agua.

En aquellos casos donde se alcanza la colmatación de materiales, o simplemente hay una acumulación importante de estos y no se realiza una labor adecuada de

conservación y remediación (lo que ocurre en muchas explotaciones mineras abandonadas), los materiales acumulados podrán ser erosionados y removilizados de nuevo por acción de la escorrentía, que inevitablemente tenderá a concentrarse en cursos de agua que buscarán su perfil de equilibrio original, generando así formas canalizadas, abarrancamientos y cárcavas (estrechas y profundas incisiones en el terreno).



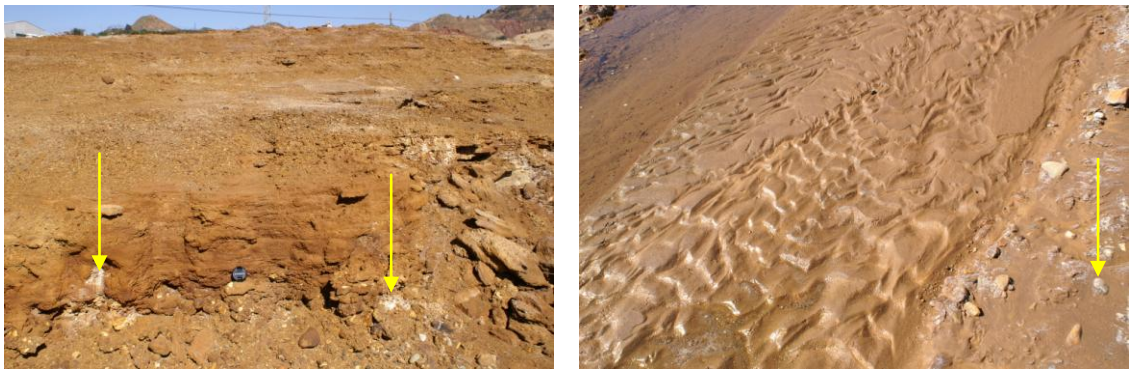
Erosión y desarrollo de formas canalizadas y abarrancamientos (flecha naranja), y cárcavas (flecha roja) en una balsa abandonada. Corresponde a una balsa del Cerro de San Cristóbal en el Distrito Minero de Mazarrón.

Por otra parte, la compactación derivada del movimiento de maquinaria pesada en superficie supone una pérdida de la capacidad de infiltración del suelo, y con ello una disminución neta en el agua que llega al acuífero (recarga). Además aumenta el agua que discurre por la superficie del terreno (escorrentía superficial), lo que a su vez genera un aumento de caudal en los cursos de agua superficiales, y con ello un incremento en su energía y por tanto de su capacidad de arranque y transporte. La pérdida de cubierta vegetal ocasionada por los trabajos mineros tiene efectos similares y se traduce igualmente en una pérdida de la infiltración y un aumento de la escorrentía superficial.



Compactación del suelo debido a una intensa actividad de carga y transporte de material. La compactación, que supone una barrera para la infiltración y la percolación de agua en el terreno, es favorecida por aspersión periódica de agua con el fin de evitar la formación de polvo (mina de bauxita de Weipa (Australia) (imágenes[52]).

Si se conjugan estos factores, *pérdida de infiltración + aumento de la escorrentía superficial + mayor exposición del material a la erosión*, entonces nos hallamos en una situación grave en la que va a producirse una gran remoción de material, aumentando con esto la carga en suspensión de las corrientes superficiales, y con ello una pérdida de la calidad física de las aguas. El otro efecto importantes es que entre el material movilizado habrá una gran parte de material potencialmente contaminante, que será transportado aguas abajo una gran distancia. En definitiva, la alteración de las condiciones hidrológicas favorece la dispersión de material contaminante, y con ello, incrementa el área afectada por la actividad minera. Tales efectos (remoción y transporte) se pueden ver amplificados durante episodios de intensas precipitaciones y avenidas. Precisamente, una pérdida de infiltración y un aumento de la escorrentía superficial, aumenta la posibilidad de que se produzcan tales fenómenos de avenida.



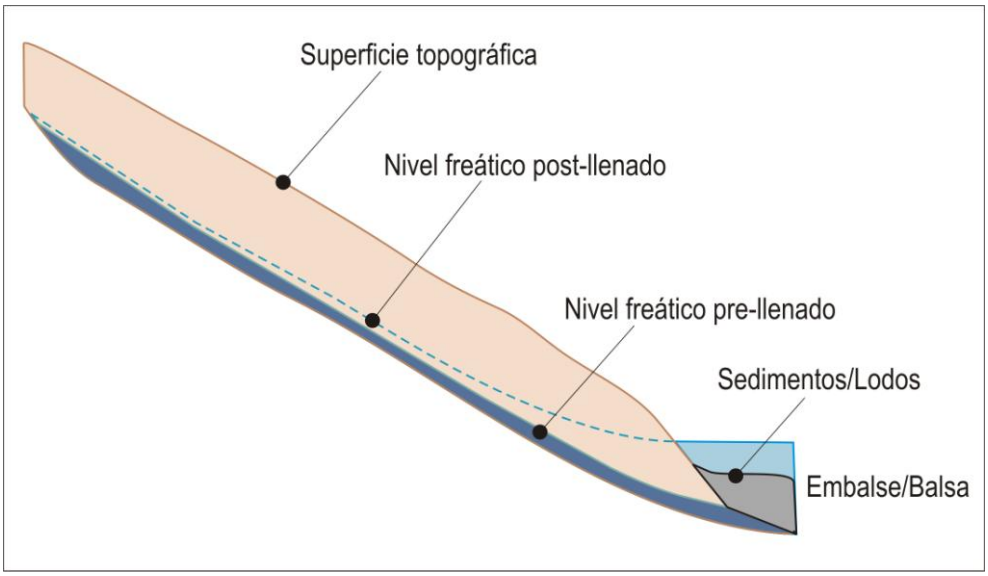
Izquierda, terraza excavada en sedimentos fluviales de rambla en el Distrito Minero de Mazarrón (España), donde se observa una alta carga de material procedente de las balsas (relaves) abandonadas del Cerro de San Cristóbal; las manchas blancas (flecha) corresponden a sulfatos derivados de la alteración de las partículas de sulfuros metálicos, y se pueden observar tanto en niveles subsuperficiales del perfil (izquierda) como en la superficie del lecho fluvial (derecha).



Comienzo de una avenida de aguas en la Rambla de las Moreras (Mazarrón) durante el inicio de un evento de intensa precipitación asociado al fenómeno meteorológico conocido como "la gota fría", frecuente en el sureste de la Península Ibérica. La foto está tomada en las proximidades del pueblo de Mazarrón. El color ocre de las aguas se debe en parte al arrastre de residuos mineros.

La demanda y consumo de agua para las actividades extractivas, y la ocupación/colmatación de zonas de masas de agua (cauces, lagunas y lagos, o incluso glaciares) conduce a una pérdida de reservas, y con ello a una pérdida del recurso. Tal como se ha expuesto al inicio de este apartado, las aguas

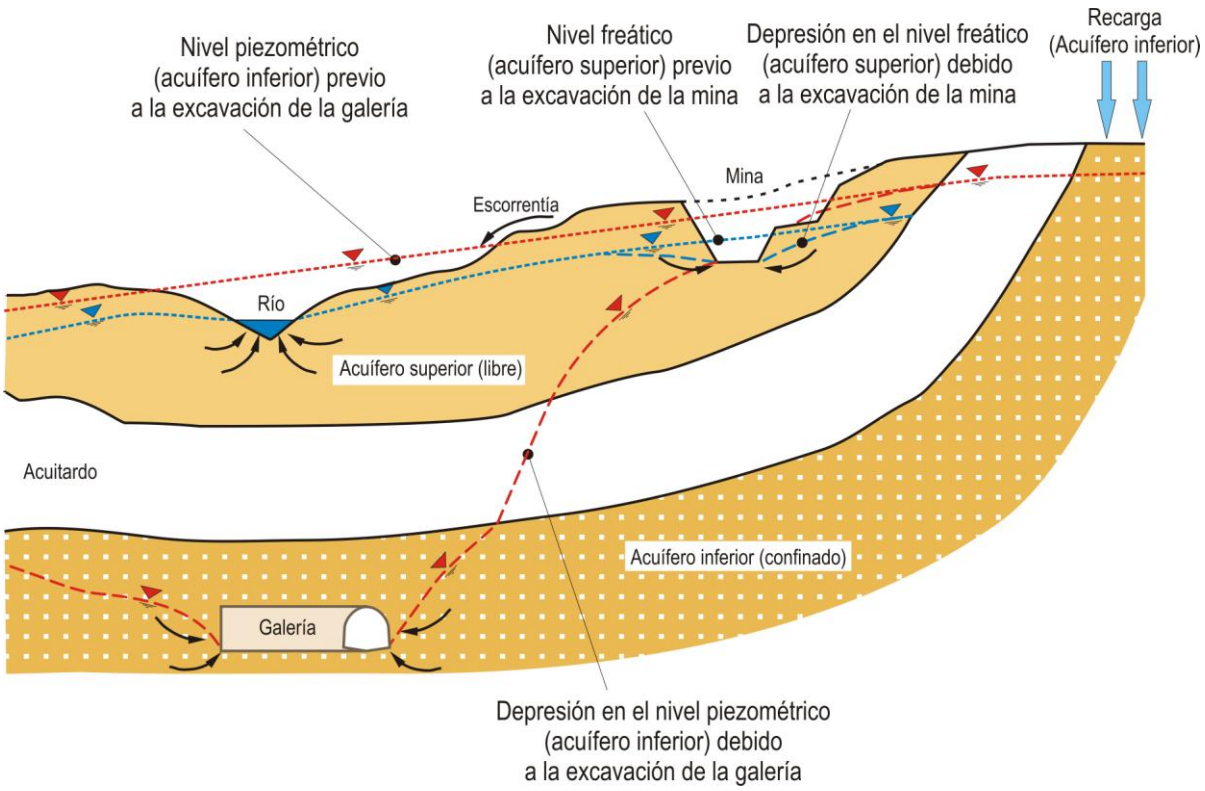
superficiales están muy relacionadas con las subterráneas. Esto hace que tal pérdida del recurso pueda afectar notablemente a las aguas subterráneas, de manera que se produzca una alteración en las condiciones hidrogeológicas originales, tales como un descenso del nivel freático, la alteración de flujos locales, etc. Estas modificaciones se sumarían a las ya provocadas por la actividad extractiva de manera directa en las aguas subterráneas. Igualmente, ascensos locales del nivel de agua asociados a embalsamientos pueden alterar las condiciones originales, elevando la cota del nivel freático en el entorno de la balsa, de manera que materiales y formaciones que antes estaban en condiciones "secas" o no saturadas pasan a estar en condiciones saturadas, y por ello en condiciones de inestabilidad desde el punto de vista geotécnico.



Ascenso del nivel freático en la ladera de un embalse o balsa. La ladera inicialmente en condiciones estables pasa a ser inestable, como consecuencia del ascenso local del nivel freático.

Cualquier caída o desplazamiento de material en masa en la ladera puede tener unas consecuencias desastrosas, sobre todo si afecta a la propia balsa, pudiendo causar el desbordamiento de esta o incluso la rotura del dique o presa. Esto a su vez podría generar una catástrofe aguas abajo, no solamente por la avenida sino también por la propia dispersión de materiales y agua contaminados. Aunque se suele asociar estos fenómenos de peligrosidad geotécnica y riesgos subsecuentes a la existencia en las laderas de formaciones cuya resistencia y estabilidad están muy condicionadas a la presencia de agua, resultados catastróficos similares pueden ocurrir si hay variaciones en la reología de formaciones rocosas localizadas en el substrato de las balsas. Estas variaciones pueden ser causadas por la combinación de cargas, presencia de agua y aumento de presiones intersticiales en ellas, tal y como parece que ocurrió en el desastre de la rotura de la balsa de Aznalcóllar (Huelva, España) en 1998. Si la zona es además sísmicamente activa, estos peligros pueden hacerse mucho mayores.

La propia extracción de material, sea a cielo abierto o por minería subterránea, tiene unos efectos directos en el gradiente hidráulico y en los niveles de las aguas subterráneas y en los niveles del agua subterránea. Estos pueden afectar el nivel piezométrico en los acuíferos confinados y semiconfinados, o freático en los acuíferos libres, deprimiéndolos como consecuencia de que la propia extracción constituye un drenaje a gran escala. Este descenso de niveles y alteración del flujo, además de una pérdida en reservas de agua subterránea, también va a tener una serie de consecuencias hidrogeológicas entre las que destacan: a) un aumento de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación desde fuentes externas al mismo; b) una pérdida de zonas y puntos de descarga de agua a la superficie (incluyendo la recarga a ríos y humedales, y el secado de manantiales); c) la inoperatividad y secado de pozos de extracción de agua; e incluso d) la posible subsidencia del terreno.



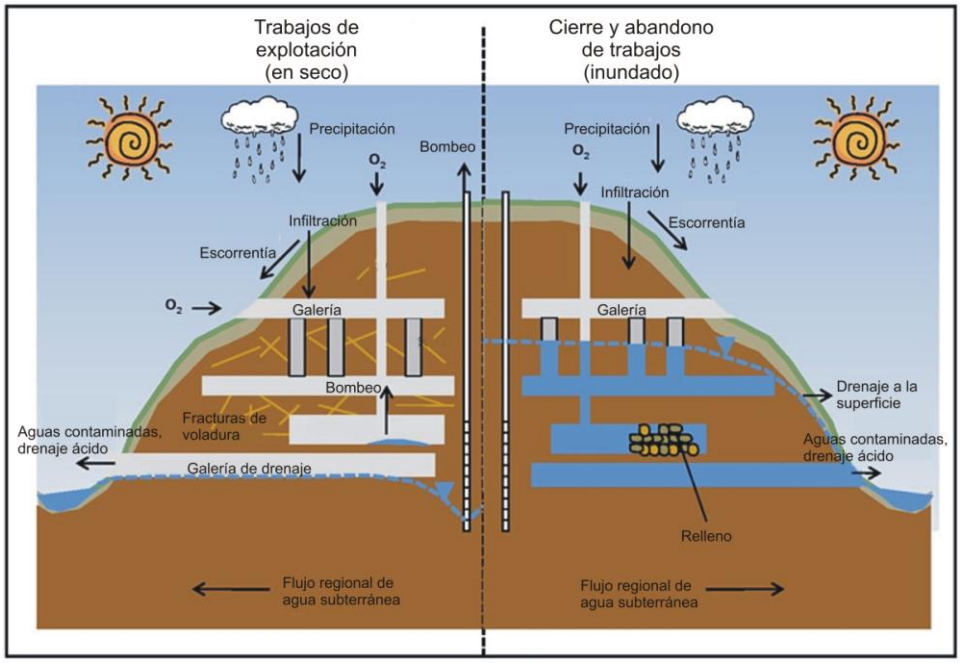
Variaciones de los niveles freáticos y piezométricos como consecuencia de excavaciones subterráneas y superficiales (basado parcialmente en Siegel, 1997).

Además de esos efectos, la excavación y remoción de la zona no saturada alterará la tasa de respuesta a posibles variaciones hidrogeológicas en el acuífero. Es importante tener en cuenta que la zona no saturada, y sobre todo el suelo presente en la parte superficial de esta, ejerce un efecto de filtro frente a la contaminación por vertidos en la superficie. La excavación y remoción de los materiales de esta zona, y el afloramiento de la zona saturada en superficie como consecuencia de la excavación, va a aumentar indefectiblemente la vulnerabilidad del acuífero frente a

la contaminación, además de causar una alteración en las condiciones de humedad de los suelos en zonas adyacentes a la excavación.

> ***Potential Effects on the Water Environment***
>
> *Water table rebound can occur in areas where dewatering has been maintained over a very long period of time, and local development in the area has taken place with regard to the modified groundwater conditions. When mineral extraction eventually ceases in the area, and the water table is allowed to return to its natural level, new problems of flooding, contamination and land instability may be experienced, as a result of rising groundwater levels. Such problems are most commonly associated with large-scale deep-mining activity (as in the Durham and East Pennine coalfields, for example), but can also occur more locally as a consequence of surface mineral working.*
>
> *Goodquarry (2011)*

No debemos olvidar que el drenaje inducido por la actividad minera en excavaciones es en la mayoría de los casos un drenaje inducido por bombeo y que una vez cese la actividad minera y con ello el bombeo, los niveles volverán a adoptar su posición original. Así los huecos mineros (galerías, pozos y cortas a cielo abierto) quedarán ocupados por agua. Estos huecos en muchos casos actuarán de vías preferentes para el flujo y circulación del agua, donde las masas de mineral reactivo quedarán expuestas a la acción de las aguas de recarga, más diluidas y oxigenadas. Por otra parte, la fracturación generada por voladura puede incrementar hasta más de 100 veces la permeabilidad del material en el entorno de la excavación, lo que determina una variación brusca del gradiente hidráulico, y con ello una variación también brusca del nivel freático o piezométrico en ese entorno. Así las características del acuífero y el modelo de flujo original de las aguas subterráneas habrán sido modificados, incluso en el caso de que los huecos hayan sido rellenados por materiales de rechazo o estériles, y la permeabilidad, capacidad de almacenamiento y conductividad hidráulica de acuífero serán muy diferentes a las originales.



Comparación esquemática de las condiciones hidrogeológicas en una explotación subterránea durante los trabajos de explotación y en el posterior cierre y abandono de los mismos. Figura adaptada de INAP (2011) (imagen53).

3.3.3 Fisicoquímica de los procesos de contaminación e incorporación de la fracción sólida

En el análisis de las afecciones químicas de las aguas por la actividad minera es fundamental considerar algunas cuestiones de partida. La "primera" es que tal afección no se restringe únicamente a la contaminación, también puede ocasionarse una pérdida de calidad del agua (p.ej., turbidez) sin que ello conlleve necesariamente la incorporación de substancias contaminantes de origen químico; la "segunda" es que el agua es el principal reactivo que a nivel general provoca la alteración química de la fase sólida, que aunque no es la única fuente de contaminación (esta puede derivar también de otros líquidos o incluso de la fase gaseosa), sí es probablemente la más importante; y la "tercera" premisa es que el agua es el principal agente de transporte, movilización y dispersión de los contaminantes derivados de la minería.

De la misma forma que no existen unos valores universales a partir de los cuales se pueda establecer si existe o no contaminación de origen antrópico, y ello ha de hacerse en base a unos valores específicos para cada caso (línea de base), tampoco existen unos parámetros absolutos que sirvan de referencia para establecer el óptimo de calidad del agua, ya que esta dependerá del uso al que se destine (un agua adecuada para el riego no lo es necesariamente para el consumo humano).

Consideremos entonces que tales valores de referencia son aquellos que tenía el agua "antes" de que se produjera la afección (nuestra línea base), independientemente de si esos valores iniciales poseían o no una calidad aceptable para los usos humanos más típicos (bebida, usos domésticos, regadío). Por otra parte, en la mayoría de los casos tal pérdida de calidad va indefectiblemente asociada a la contaminación, como sucede por ejemplo en el caso del drenaje ácido, donde la acidificación va acompañada de la incorporación de metales pesados a la solución ácida.

F actors of mine water chemistry

A quantitative understanding of the processes governing acid mine drainage remains elusive. These are particularly complex to tackle, not least because the chemistry of mine waters is seldom controlled purely by thermodynamic equilibria between mineral and dissolved phases. A satisfactory quantitative model needs to address the following issues:

1. Three-phase interaction between mineral, gas and water phases, often on a seasonally fluctuating basis (e.g. in the zone of water-table fluctuation).
2. The importance of kinetic factors; the rates of reaction and consumption of carbonate, sulphide and silicate phases, diffusion-limited steps.
3. The role of bacteria as biocatalysts in sulphide oxidation. Nevertheless, a thorough understanding of the mechanisms and controls on the geochemistry of mine-water evolution remains a priority task. There is an acute need to be able to predict the quality of pumped mine water when a new mine is commissioned or of drainage water when a mine is abandoned

Banks et al. (1997)

La actividad minera provoca un aumento en la reactividad de los materiales, aunque recordemos que estos estaban allí antes de que se iniciara la actividad, y que por esto "ya estaban reaccionando" con el agua en diferentes procesos

naturales, produciendo así un aporte de sustancias a las aguas (anomalía geoquímica = contaminación "natural") (ver además apartado 5.2). Así, el incremento de reactividad asociada a la minería se debe fundamentalmente a un aumento en el grado de exposición del material y a una variación en las condiciones fisicoquímicas del medio:

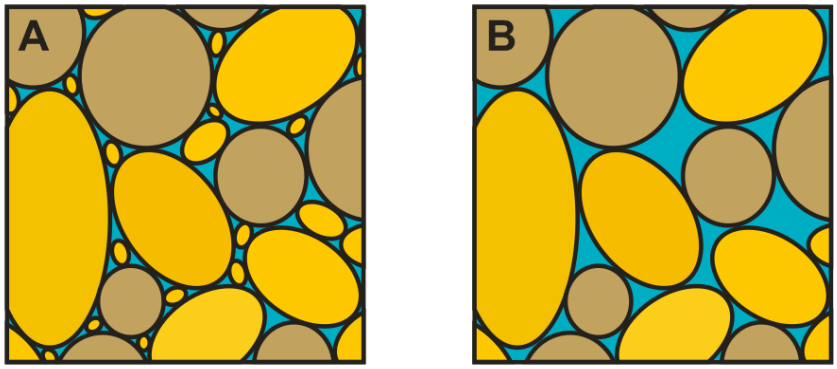
Aumento del grado de exposición

- Aumento de la superficie específica (relación superficie/masa) de la mena por reducción de tamaño de partícula (a menor tamaño de partícula, más superficie específica; ver siguiente figura).
- Incremento de la porosidad efectiva (mayor volumen de huecos y mayor interconexión de ellos), y por tanto más volumen de agua en contacto con el material, agua que además puede estar fluyendo a través de este. Esto viene condicionado, por una mayor selección de tamaños en materiales procesados, por una parte, y por el desarrollo *in situ* de fracturación inducida por las voladuras de roca en el entorno próximo de la mina. La facilidad con que el agua fluya a través del material poroso (es decir, la transmisividad hidráulica) va a condicionar el tiempo de residencia/renovación del agua intersticial, y con esto, la posibilidad de que se alcancen condiciones de metaequilibrio con la fase sólida[1] en los poros. En otras palabras, la transmisividad hidráulica junto con la cinética de las reacciones implicadas condicionarán la velocidad de alteración y movilización subsecuente de componentes al agua, o alternativamente, la retención de estos en la fase sólida.



Variación de la superficie específica del cubo 1 con la variación del tamaño de partícula. Aunque las partículas de 2 son de menor tamaño, representan una superficie específica que es el doble de la superficie original, en tanto que en el caso 3 la superficie es el triple de la original (imagen[54]).

[1] Se incluye aquí la materia orgánica de los suelos, que con las arcillas forma complejos organominerales, cuya carga de superficie les confiere una gran capacidad de retención de metales (complejo adsorbente).



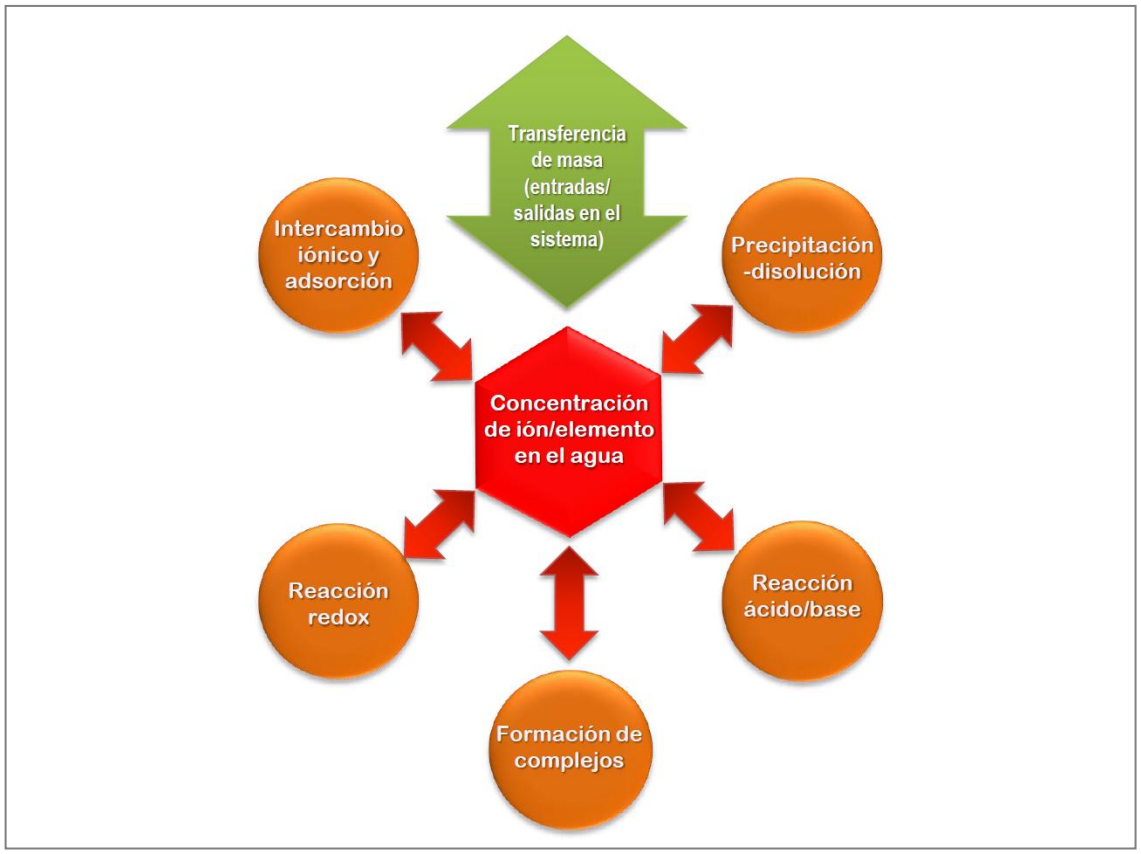
Variación de la porosidad efectiva con el grado de selección del material particulado. El caso A corresponde a un material con muy poca selección, de manera que los huecos interpartículas son pequeños, y muchos de ellos van a tener un tamaño capilar donde las fuerzas de adhesión de las moléculas de agua a la superficie de las partículas pueden ser altas (retención capilar), así el agua fluirá preferentemente por los huecos más grandes. El caso B corresponde a un material con buena selección, los huecos son más grandes, y habrá más facilidad para que fluya el agua. En otras palabras, la transmisividad hidráulica será mayor.

Una variación de las condiciones fisicoquímicas (*que puede ocurrir por*):

- Una modificación en las condiciones hidrológicas del medio por oscilación y/o descenso de niveles, instauración de flujos, movimientos de las aguas subterráneas y superficiales, e infiltración de las aguas meteóricas.
- La retirada de materiales que ejercen un efecto "tampón" (*buffering*) en el pH o de retención de complejos iónicos, por acción de los carbonatos y/o feldespatos y arcillas tipo esmectita respectivamente.

El estudio de la presencia y evolución de contaminantes mineros en el agua, fundamentalmente metales y ocasionalmente compuestos orgánicos, debe hacerse desde la consideración de un sistema polifásico donde intervienen el agua, la fase sólida y los gases. En un sistema polifásico la incorporación de contaminantes al agua tendrá lugar sobre todo por la interacción agua ─ fase sólida, sobre todo la fase mineral, y por mezcla con otras aguas de fuentes exógenas al medio. Por el contrario, los contaminantes podrán ser extraídos del sistema por la propia circulación de agua hacia lugares con menor potencial hidráulico, por la adsorción de las plantas, o incluso por volatilización (un mecanismo importante para algunos metales como el mercurio). En este sistema complejo la concentración de los contaminantes en el agua va a estar gobernada por una serie de procesos interrelacionados que incluyen reacciones ácido-base, reacciones de complejación, reacciones de oxidación-reducción (*redox*), reacciones de precipitación-disolución, reacciones de adsorción-desorción, y reacciones de biodegradación. Las primeras reacciones van a ser especialmente relevantes en el caso de los metales pesados,

mientras que las últimas tienen especial incidencia en los contaminantes con moléculas orgánicas (McLean y Bledsoe, 1992).



Principales reacciones y procesos químicos que intervienen en la ocurrencia de metales en el agua. La reacciones están además relacionadas entre sí.

La cinética de las diferentes reacciones implicadas en la evolución de los contaminantes puede ser variable, a veces relativamente rápida (p.ej. volatilización de mercurio) y otras relativamente lenta (p.ej. oxidación y disolución de sulfuros). En este sentido es fundamental considerar que en los procesos de interacción agua-mineral participan diferentes minerales en diferentes reacciones con diferente cinética. Así, los resultados de unas pueden obliterar o amortiguar los resultados de otras, como ocurre en la disolución de carbonatos donde el pH estará tamponado (esto es, estabilizado). De esta manera, si no hay carbonatos en el sistema, la oxidación y disolución de sulfuros provocará un descenso acusado del pH del agua. De ahí que sea importante considerar no solo los minerales de mena (potencialmente contaminantes), sino además los minerales presentes de manera primaria o secundaria de la roca encajante. Aquí entran los minerales de ganga y de alteración.

Los metales y metaloides se encuentran presentes en el agua en diferentes especies químicas, como iones libres (p.ej., Cd^{2+}, Zn^{2+}, Cr^{3+}), en complejos solubles con ligandos inorgánicos u orgánicos (p.ej., $CdSO_4$, $ZnCl^{+}$, $CdCl_3^{-}$) o asociados a coloides minerales, orgánicos u organominerales. Los complejos están

constituidos por un ión metálico ligado a otros átomos o moléculas las cuales actúan como ligandos (por ejemplo, en $CdHCO_3^+$, el ión bicarbonato HCO_3^- es el ligando) con una disposición geométrica determinada. Así, los metales y metaloides pueden formar complejos solubles con ligandos inorgánicos (p.ej., con HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, OH^-, PO_4^{3-}, NO_3^- y CO_3^{2-}) y orgánicos (p.ej., con ácidos aromáticos, alifáticos, aminoácidos y constituyentes solubles de ácidos fúlvicos). Estos últimos son importantes en la parte edáfica más superficial de la zona no saturada.

La concentración (total) de un metal en el agua es la suma de las concentraciones de sus diferentes especies acuosas, incluyendo los coloides que pueden ser especialmente relevantes en la movilización ciertos metales y metaloides como el arsénico (p.ej., Smith, 1999; Smedley y Kinniburgh, 2002; Garrido et. al., 2011).

La especiación de un contaminante no solo es determinante en cuanto a su retención en la fase sólida no coloidal *versus* su movilidad como fase acuosa, sino que también lo es, y esto es de gran importancia, en relación a su biodisponibilidad y toxicidad. Así, se requiere conocer no solo "cuánto", sino también "cómo" está un metal o metaloide en el agua si se quiere evaluar el riesgo ambiental de su presencia en esta. Como ejemplo ilustrativo basta mencionar el caso del cromo. No es lo mismo que la especie disuelta sea Cr^{3+} que Cr^{6+}. Esta última es cancerígena y su importancia quedó bien retratada en la película "Erin Brockovich" (basada en un caso real).

Las reacciones ácido-base implican la transferencia de iones de hidrógeno H^+, por esto afectan directamente al pH del agua (recordemos que pH = – log $[H^+]$). La mayor parte de los minerales formadores de rocas son bases que consumen H^+. Simplemente por la reacción de partida del agua con el CO_2 atmosférico y el de los poros del suelo da lugar a la formación de ácido carbónico que contribuye al ataque y disolución[2] de silicatos y carbonatos:

$$CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow H_2CO_{3(aq)} \leftrightarrow H^+_{(aq)} + HCO_{3(aq)}$$

$$CaCO_{3(s)} + CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow Ca^{2+}_{(aq)} + 2HCO_3^-{}_{(aq)}$$

$$2NaAlSi_3O_{8\ (s)} + 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)} \leftrightarrow 2Na^+_{(aq)} + 2HCO_3^-{}_{(aq)} + Al_2Si_2O_5(OH)_{4(s)} + 4SiO_{2(aq)}$$

$$CaCO_{3(s)} + H^+_{(aq)} \rightarrow Ca^{2+}_{(aq)} + HCO_3^-{}_{(aq)}$$

$$CaAl_2Si_2O_{8(s)} + 2H^+_{(aq)} + 6H_2O \rightarrow Ca^{2+}_{(aq)} + 2Al(OH)_{3(s)} + 2H_4SiO_{4(aq)}$$

$$KAl_2SiO_{8(s)} + 3H^+_{(aq)} + H_2O \rightarrow K^+_{(aq)} + Al^{3+}_{(aq)} + H_4SiO_{4(aq)} + 3OH^-_{(aq)}$$

[2] La disolución tiene lugar como **reacción de disolución congruente**, en la que el mineral es disociado y entra en disolución en forma de iones simples; o como **reacción de disolución incongruente**, en la que el mineral reacciona con el agua, descomponiéndose en una fase mineral distinta de la reactante y en especies químicas que entran en solución.

Por tanto, las reacciones de alteración de carbonatos y silicatos tienen una capacidad de tamponamiento sobre el pH del medio, de manera que las reacciones con carbonatos (p.ej., calcita) tenderán a mantener el pH tamponado en rangos de pH 6,5-7,5 o incluso cercanos a valores de pH 8,5. Por su parte, las reacciones de silicatos tienen una capacidad de tamponamiento en un rango de pH de 5-6 (p.ej., Lottermoser, 2010). Este tamponamiento puede contrarrestar la incorporación de H^+ al agua como consecuencia de algunas de las reacciones más comunes en medios mineros como la disolución oxidante de la pirita, responsable fundamental de la formación de drenaje ácido:

$$2FeS_{2(s)} + 7O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow 2Fe^{2+}_{(aq)} + 4SO_4^{2-}{}_{(aq)} + 4H^+_{(aq)}$$

$$FeS_{2(s)} + 14\ Fe^{3+}_{(aq)} + 8\ H_2O_{(l)} \rightarrow 15\ Fe^{2+}_{(aq)} + 2\ SO_4^{2-}{}_{(aq)} + 16\ H^+_{(aq)}$$

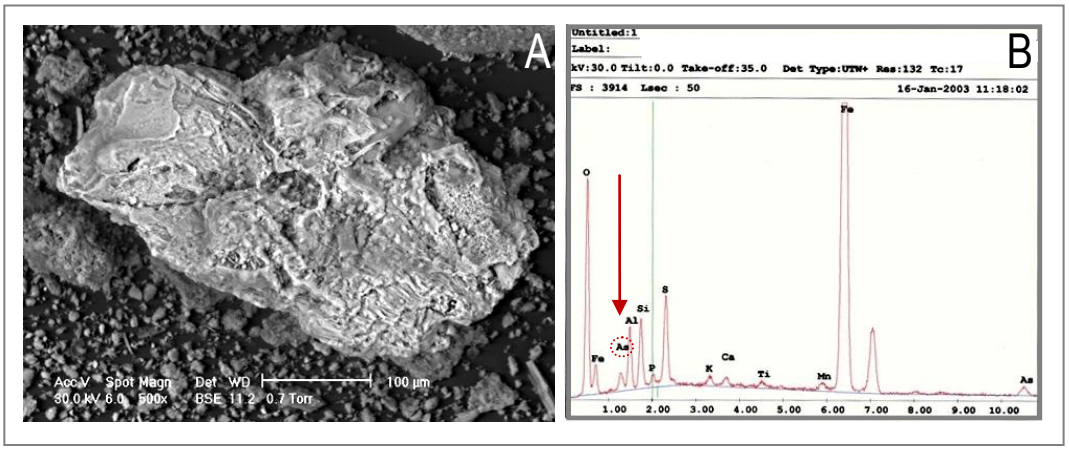
Sin embargo, la capacidad de tamponamiento es limitada y como ya se expuso anteriormente en este capítulo, a diferentes rangos de pH los mecanismos de tamponamiento van a ser distintos. Inicialmente, y en ausencia de carbonatos, el tamponamiento se producirá por reacciones de intercambio catiónico, donde el ión H^+ desplazará a los cationes metálicos adsorbidos en la superficie de la fase sólida. A rangos de pH aún más bajos, propios ya de un medio ácido o muy ácido, el tamponamiento ocurrirá por la disolución de hidróxidos de Al y Fe.

Generalmente son los carbonatos, si están presentes en suficientes cantidades, los que ejercen la capacidad neutralizante en el sistema agua-roca, ya que reaccionan lo suficientemente rápido con respecto a la tasa de producción de ácido por la oxidación de sulfuros. Por el contrario, los silicatos no se disuelven lo suficientemente rápido como para neutralizar "todo" el ácido generado, aunque su presencia/ausencia puede ser decisiva en muchas ocasiones (p.ej., Oyarzun et al., 2007). Al respecto, las rocas silicatadas máficas e intermedias (p.ej., basaltos, andesitas) tienen un mayor poder neutralizante que las félsicas (p.ej., dacitas, riolitas) ya que los silicatos que las constituyen (olivino, plagioclasas cálcicas, piróxenos, anfíboles) se alteran mucho más rápidamente (Eary y Williamson, 2006). Otro mecanismo alternativo que genera una atenuación de la acidez del agua se relaciona con la formación reductiva de sulfuros (metálicos o sulfuro de hidrógeno) a partir de sulfatos con la participación de bacterias. Estos procesos frecuentemente se observan en explotaciones abandonadas, una vez que estas se inundan nuevamente y el flujo de agua es muy lento o prácticamente inexistente, de forma que se desarrollan condiciones reductoras (Banks et al., 1997).

En la práctica, es muy difícil distinguir el mecanismo de retención, digamos precipitación-coprecipitación *versus* adsorción (de ahí que muchas veces se utilice el término inespecífico de "sorción") del contaminante en la fase sólida, si esta última, como ocurre en la mayoría de los casos, es un producto secundario de

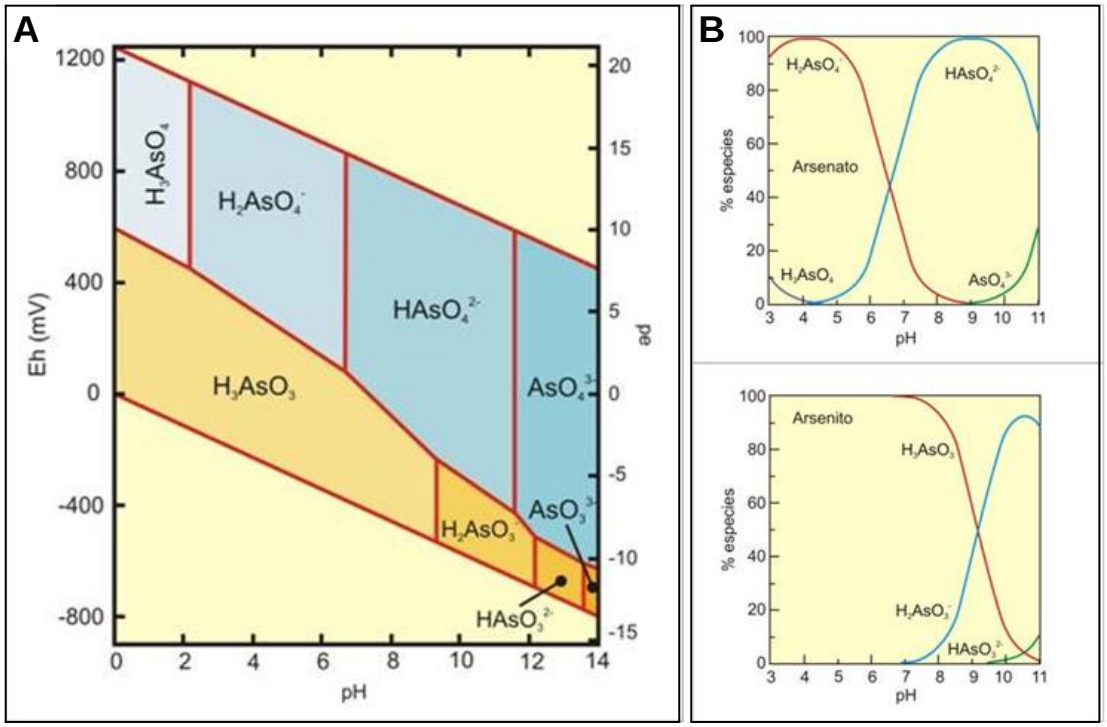
alteración como hidróxidos y oxihidróxidos, carbonatos, sulfatos y otras sales complejas.

Mientras que en la precipitación y coprecipitación el metal o metaloide queda incorporado en la estructura del mineral, en el caso de la adsorción este se incorpora a su superficie con mayor o menor fuerza, dependiendo de las cargas eléctricas en juego. En este sentido, las implicaciones en cuanto a una potencial movilización del contaminante desde la fase sólida al agua son muy diferentes. En el caso de la precipitación-coprecipitación hará falta la disolución del mineral albergante, mientras que en el caso de la adsorción, bastará con que haya un aumento de concentración de otro ión en el agua de manera que entre en competencia con el adsorbido por ocupar las sedes de cambio en la superficie de la fase sólida y termine así desplazándolo (desorción por intercambio iónico).



A. Imagen BSE del microscopio electrónico de barrido (ESEM) de un grano de goethita B. Espectro semicuantitativo de un análisis químico puntual mediante Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) sobre el mismo grano, donde se muestra la presencia de As (flecha), el cual puede estar coprecipitado o adsorbido en esa partícula. Imágenes adaptadas de Oyarzun et al. (2004).

La precipitación tiene lugar cuando las concentraciones de los componentes que constituyen la fase a formar son lo suficientemente altas para unas condiciones dadas de pH, Eh, temperatura, presión, etc. Esto ocurre cuando se supera el "índice de saturación", lo que significa que el agua está sobresaturada en esa fase mineral. Si las condiciones varían, la fase pasará a ser inestable. Sin embargo, ni la precipitación ni la disolución tienen lugar de forma instantánea y esto es así debido a restricciones impuestas por la propia cinética de las reacciones. De la misma manera, las diferentes especies acuosas de un metal o metaloide van a tener su campo de estabilidad dependiendo de las condiciones fisicoquímicas en el medio, lo cual como ya se ha indicado más arriba tendrá sus consecuencias en cuanto a movilidad y biodisponibilidad de los diferentes contaminantes en el agua.



A. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As–O_2–H_2O a 25ºC y 1 bar de presión total. B. Predominio de especies de As^{5+} y As^{3+} en función del pH. En condiciones oxidantes de aguas de mina, el Arsenato → As^{5+} predomina sobre el Arsenito → As^{3+}, encontrándose fundamentalmente como $H_2AsO_4^-$ a valores de pH bajos (inferiores a 6,9), mientras que a pH más alto, la especie dominante es $HAsO_4^{2-}$. En ambientes saturados con escasa circulación, puede pasar a predominar el Arsenito (As^{3+}) . Con una evolución del sistema a condiciones reductoras, se puede facilitar la movilización de arsénico debido a que el arsenito es adsorbido más débilmente que el arsenato (imagen[55]).

Las reacciones de oxidación-reducción (reacciones *redox*) tienen lugar cuando hay un intercambio de electrones entre especies disueltas en el agua (reacciones homogéneas) o entre una especie y un gas o una fase sólida (reacciones heterogéneas). Las reacciones homogéneas pueden ser relativamente rápidas si solo está involucrado un electrón, a diferencia de aquellas reacciones donde intervienen dos electrones o son heterogéneas, que son más lentas a menos que participe un catalizador (p.ej., una bacteria) o se realicen a mayor temperatura (Nordstrom, 2000).

Existe una dificultad inherente cuando se pretende establecer el valor del Eh en el agua y se deriva, entre otras razones, de la propia perturbación que provoca la sonda (para hacer la medición) en el medio cuando esta se introduce en el agua, de manera que la lectura obtenida ya no representa las condiciones originales.

Tampoco sirve el considerar varios pares de especies químicas que puedan indicar las condiciones de equilibrio *redox* porque no darán un valor único ya que alcanzan el equilibrio en diferentes momentos. Esto último se refleja en que el agua no tiene un potencial *redox* único y que tampoco las especies químicas presentan un

equilibrio *redox* entre ellas. De esta manera, la única forma de entender la química *redox* es conocer la velocidad y mecanismos de las reacciones, y el origen y destinos principales de las especies *redox* activas (Nordstrom, 2000).

Los procesos de adsorción, ya descritos en el apartado 3.2 de este capítulo, constituyen uno de los principales mecanismos de interacción agua-fase sólida. De esta forma, los procesos de adsorción son posiblemente los principales responsables de la retención de contaminantes presentes como especies iónicas en el agua de los medios edáficos (en materia orgánica y complejos órganominerales) o con altos contenidos en arcillas, así como en óxidos, hidróxidos y oxidróxidos de Fe. Los contaminantes quedarán fuertemente retenidos dependiendo de si esos iones se encuentran adsorbidos en el complejo adsorbente como complejos de esfera interna o complejos de esfera externa, y de cómo afecten las variaciones de pH en los grupos funcionales de superficie de la fase sólida.

A bajas concentraciones los metales quedan adsorbidos como complejos de esfera interna (adsorción específica) quedando de esta manera fuertemente retenidos. A altas concentraciones se produce además la adsorción por intercambio iónico, constituyendo esta la fracción lábil, susceptible de movilizarse de nuevo al agua.

Redox disequilibria is the rule

Redox studies on aquatic systems in the lab and in natural waters lead to the following conclusions:

1. The absence of aqueous electrons in natural waters means they cannot be measured nor defined by analogy with aqueous protons.

2. Ground waters and surface waters do not have a "redox potential," pε, or Eh but they do have a pH.

To speak of a redox potential of an aqueous solution or natural water does not have any meaning.

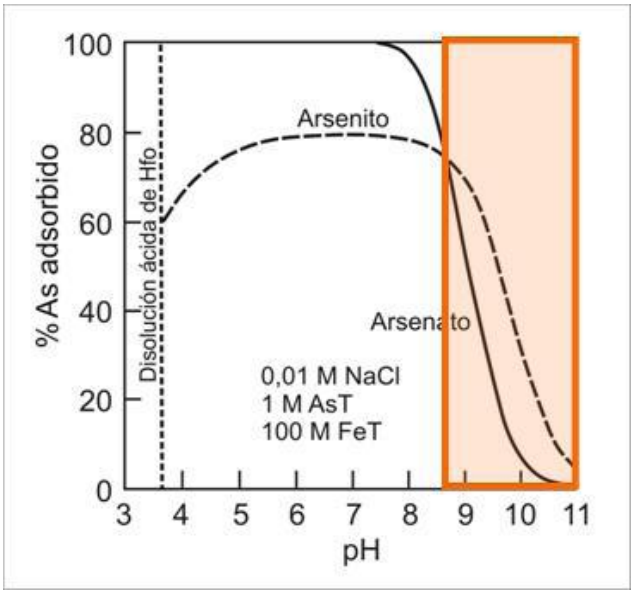
3. Redox species in waters do not reach an equilibrium state readily, if at all. Redox disequilibria is the rule …
5. To determine the redox chemistry of a water it is necessary to determine all the relevant redox species directly. These species can be expected to react in different ways and at different rates.

Homogeneous redox reactions can be rather slow and heterogeneous redox reactions can be even slower …

Nordstrom (2000)

La materia orgánica (humus) tiene una alta capacidad de adsorción de cationes metálicos, sin embargo la carga de superficie (a diferencia de las arcillas) es fundamentalmente variable y dependiente del pH, de forma que un descenso de este provocará inevitablemente una desorción del catión previamente adsorbido. Otro factor a tener en cuenta en relación con la desorción iónica es la competencia que se establece entre iones por ocupar los lugares de adsorción de complejos de esfera externa. Esto determina que un ión previamente adsorbido pueda ser desplazado (y por tanto, desorbido) si un ión en competencia adquiere una concentración alta en la solución, produciéndose así un intercambio iónico en el lugar de adsorción (llamado por esto "lugar" o "sede" de intercambio). Así, en medios que pasan a ser muy ácidos, los metales previamente adsorbidos en la superficie de la fase sólida pueden ser desplazados de esta por H^+ o Al^{3+}. Lo

mismo ocurre en medios que pasan a ser alcalinos, donde la concentración alta de determinados iones y OH^-, puede provocar el intercambio iónico y con ello la desorción de determinados componentes. Estos mecanismos competitivos han de ser tenidos en cuenta en el caso de correcciones químicas basadas en la adición de calcio, metal que puede provocar la movilización de metales contaminantes como el cadmio (McLean y Bledsoe, 1992).

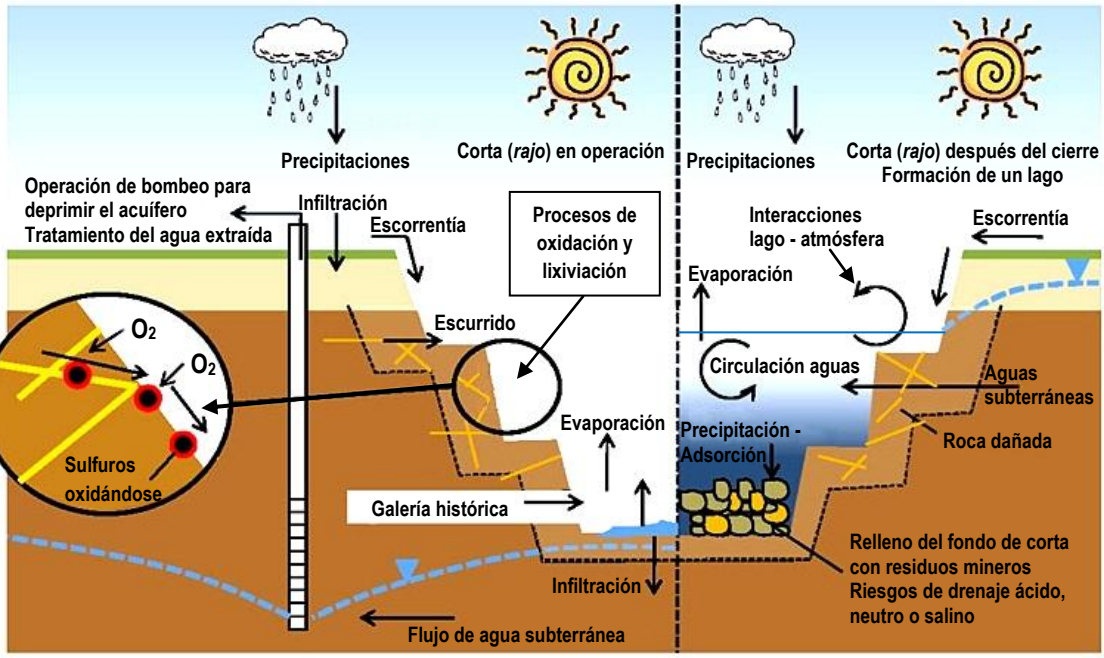


Curvas de adsorción de As^{3+} y As^{5+} en oxihidróxido férrico (Hfo), en función del pH. El área sombreada representa el rango de pH para el cual se produce la máxima desorción de As. Imagen adaptada de BGS y DPHE (2001).

Los diferentes materiales muestran una afinidad variable por las diferentes especies iónicas. Por ejemplo, los iones complejos selenito (SeO_3^{2-}) y arsenato (AsO_4^{3-}) son fuertemente retenidos en óxidos al ser adsorbidos por mecanismos de adsorción específica. Por otra parte, selenato (SeO_4^{2-}) y Cr^{6+} lo son como complejos de esfera externa, y por tanto, intercambiables con otros aniones que compitan con ellos. También con respecto a montmorillonita (*esmectita*) y caolinita, el cromo hexavalente es el más lábil (*poco estable*), siendo la secuencia de movilización la siguiente: Cr^{6+} > Se > As^{3+} > As^{5+} > Cd > Zn > Pb > Cu > Cr^{3+}, (McLean y Bledsoe, 1992; y referencias ahí citadas). A veces, como es el caso de selenito Se^{4+} y selenato Se^{6+}, la forma química más tóxica es la que queda más fuertemente retenida en la fase sólida; pero desafortunadamente en otras como en el caso del cromo, la forma más lábil (Cr^{6+}) es la más tóxica.

De la misma manera que los efectos en las condiciones hidráulicas son de "doble camino", es decir, hay unos efectos durante la explotación y otros posteriores a ella, lo mismo sucede en el caso de los procesos fisicoquímicos que afectan al agua. Esto es así porque las condiciones del medio se ven modificadas, desde aquellas que tienen lugar durante la explotación a las que se instauran una vez que

la mina se clausura. Así, dentro de las limitaciones existentes en cuanto a huecos generados, porosidad inducida, barreras construidas, etc., el sistema tenderá a regresar a las condiciones hidráulicas originales (niveles de agua, flujo, etc.). Esto significa que se generarán nuevas condiciones físicoquímicas, con unos efectos que pueden ser substancialmente diferentes a aquellos que se daban durante los trabajos de explotación. De esta manera, puede que se detenga la alteración de materiales y movilización de contaminantes, o que por el contrario la alteración se pueda incrementar. Por ello, es fundamental que en proyectos de restauración se consideren estos aspectos, ya que el resultado puede ser contrario al perseguido.



Efectos del cambio en las condiciones hidráulicas, y con ello en las condiciones fisico-químicas, de una mina a cielo abierto por el cierre y abandono de los trabajos de explotación. La alteración del material, y el drenaje y movilización de metales pueden quedar muy limitados si en el lago formado en la corta o rajo, la circulación interna del agua es muy restringida (lago estratificado), y con ello la oxigenación de las capas más bajas del mismo. En ese caso, el ambiente reductor generado en las capas bajas del lago contrasta con las condiciones predominantemente oxidantes en todo el entorno de la corta durante la explotación. Figura adaptada de INAP (2011) (imagen[53]).

Bibliografía

Atención: *Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.*

Banks, D., Younger, P.L., Arnesen, R.T., Iversen, E.R. y Banks, S.B., 1997. Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly. Environmental Geology, 32, 157-174.

BGS y DPHE, 2001. Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. En: Kinniburgh D.G.y Smedley P.L. (Eds.) Volume 2: Final Report. BGS Technical Report WC/00/19, British Geological Survey, http://nora.nerc.ac.uk/11986/

CAM, 2011. Suelos contaminados. Comunidad Autónoma de Madrid, http://www.madrid.org/cs/Satellite?c=CM_InfPractica_FA&cid=1114178591774&idTema=1109265600870&language=es&pagename=ComunidadMadrid%2FEstructura&pid=1109265444831&segmento=1&sm=1

Chemie.de, 2011. Itai-itai disease. http://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Itai-itai_disease.html

Dalewski, F., 1999. Removing arsenic from copper smelter gases. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 51, 24-26.

De Angelo, L., 2008. London smog disaster, England. The Ecyclopedia of Earth, http://www.eoearth.org/article/London_smog_disaster,_England

Del Río, J., 2010. Paisajes granadinos poco conocidos 6: Espartales de las hoyas de Guadix y Baza. http://www.otragranada.org/spip.php?article256&id_document=381#documents_portfolio

Eary, L.E. y Williamson, M.A., 2006. Simulations of the neutralizing capacity of silicate rocks in acid mine drainage environments. In: R.I. Barnhisel, ed., Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis, MO, USA, 564-577.

EcoMerge, 2010. What is soil compaction and when is it a problem. http://ecomerge.blogspot.com/2010/05/what-is-soil-compaction-and-when-is-it.html

Eltschlager, K.K., Harris, M.L. y Baldassare, F., 2004. Fugitive carbon-based gases: blasting related or not. En: NIOSH, http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pubreference/outputid200.htm

ELAW, 2010. Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs. Environmental Law Alliance Worldwide, 1st Edition, https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Full-Guidebook.pdf

Encyclopaedia Britannica, 2011a. Shockwave. http://www.britannica.com/EBchecked/topic/541339/shock-wave

Encyclopaedia Britannica, 2011b. Laterite. http://www.britannica.com/EBchecked/topic/331578/laterite

Gamble, J.F. y Gibbs, G.W., 2008. An evaluation of the risks of lung cancer and mesothelioma from exposure to amphibole cleavage fragments: Regulatory Toxicology and Pharmacology, 52, S154–S186.

Garrido, F., Laborda, F., Bolea, E., Helmhart, M., O'Day, P. y Serrano, S., 2011. Colloidal arsenic distribution and speciation in mine soils. Goldschmidt Conference Abstracts, http://www.goldschmidt2011.org/abstracts/abstractView?abstractId=4332

Goodquarry, 2011. Potential effects on the water environment. http://www.goodquarry.com/article.aspx?id=63&navid=12

Greene, N., 2011. Apollo 1 fire: an early blow to the space program. About.com, Space/Astronomy, http://space.about.com/cs/astronautbios/a/apollo1.htm

Habashi, F., 1994. Conversion reactions in inorganic chemistry. Journal of Chemical Education, 70, 130-131.

INAP, 2011. Development of the global acid rock drainage guide. INAP: The International Network for Acid Prevention, http://www.gardguide.com/index.php/Main_Page

INE, 2007. Censo agropecuario y forestal 2007: Resultados por comuna. Instituto Nacional de Estadísticas – Chile. http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censo_agropecuario_07_comunas.php

IVEX Chile, 2003. Fertilizantes en Chile. Instituto Valenciano de la Exportación, http://www.italcal.cl/pdf/fertilizantes%20en%20chile.pdf

Kodešová, R., Šimunek, J., Nikodem, A. y Jirku, V., 2010. Estimation of the dual-permeability model parameters using tension disk infiltrometer and guelph permeameter. Vadose Zone Journal, 9, 213–225.

Lagos, G., 2011. ¿Es viable la fundición de Ventanas? La Tercera, http://www.latercera.com/noticia/opinion/ideas-y-debates/2011/04/895-356348-9-es-viable-la-fundicion-de-ventanas.shtml

Lottermoser, B., 2010. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Springer, 400 pp., http://books.google.es/books

McLean, J.E. y Bledsoe, B.E., 1992. Behavior of materials in soils. US EPA, EPA/540/S-92/018, www.epa.gov/tio/tsp/download/issue14.pdf

Méndez, R., 2006. 12 millones de personas respiran aire sucio. El País, Sociedad, Domingo 5 de Febrero de 2006, http://www.elpais.com/articulo/sociedad/millones/personas/respiran/aire/sucio/elpepusoc/20060205elpepisel_1/Tes

Méndez, R., 2010. La primera mina de oro submarina abre la conquista del lecho oceánico. Sección Sociedad, El País, Sábado 23 de Octubre de 2010, p. 32, http://www.igme.es/internet/salaprensa/medios/El_Pa%C3%ADs_23-10-2010 .pdf.

MIDWEST, 2011. Spray, seal, prevent fugitive dust. Mine Tailings Dust, MIDWEST, http://www.midwestind.com/problems-we-solve/controlling-dust/dust-control-mine-tailings.html

Milham, S. y Strong, T., 1974. Human arsenic exposure in relation to a copper smelter. Environmental Research, 7, 176-182.

Ministry of the Environment, 2011. Minamata Disease, the history and measures. Ministry of the Environment Government of Japan, http://www.env.go.jp/en/chemi/hs/minamata2002/

Moreno, T., 2007. Aerosoles atmosféricos: problemas ambientales. Aula2puntonet, Temas Ambientales, http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Particulado_aereo/Particulado_aereo.pdf

Navarro, M.C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., Vidal, J., Tovar, P.J. y Bech, J., 2008. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: a case study in a semi-arid zone. Journal of Geochemical Exploration, 96, 183-193.

NASA, 2009. SAGE II: Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II. National Aeronautics and Space Administration. http://www-sage2.larc.nasa.gov/Introduction.html

NIOSH, 2000. An underground coal mine fire preparedness and response checklist: the instrument. Information Circular/2000, http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/ic9452.pdf

Nordstrom, D.K. 2000. Aqueous Redox Chemistry and the Behavior of Iron in Acid Mine Waters. In Wilkin, R.T., Ludwig, R.D., and Ford, R.G., eds, Proceedings of the Workshop on Monitoring Oxidation-Reduction Processes for Ground-water Restoration, Dallas, Texas, April 25-27, 2000: Cincinnati, OH, U.S. Enviromental Protection Agency, EPA/600/R-02/002, http://water.usgs.gov/nrp/proj.bib/Publications/nordstrom_epa.pdf

NRCCA, 2010. Soil infiltration. Northeast Region Certified Crop Adviser (NRCCA) Study Resources, Cornell University, http://nrcca.cals.cornell.edu/soil/CA2/CA0211.1.php

O'Day, P.A. y Vlassopoulos, D., 2010. Mineral-based amendments for remediation. Elements, 6, 375-381.

Oppenheimer, C., 2004, Volcanic degassing. En: Rudnick, R.L. (Ed), Treatise on Geochemistry, Volume 3 (The crust): Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 123-166.

Oyarzún, M., 2010. Contaminación aérea y sus efectos en la salud. Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias, 26, 16-25.

Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Oyarzun, R., Lillo, J., Higueras, P., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio–Tambo district) *vs.* geologic processes. Journal of Exploration geochemistry, 84, 53-64.

Oyarzun, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. e Higueras, P., 2007. Mineral deposits and Cu–Zn–As dispersion–contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. Environmental Geology, 53, 283-294.

Oyarzun, R., Cubas, P., Higueras, P., Lillo, J. y Llanos, W., 2009. Environmental assessment of the arsenic-rich, Rodalquilar gold–(copper–lead–zinc) mining district, SE Spain: data from soils and vegetation, Environmental geology, 58:761-777.

Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzún, J., Maturana, H., Canut, C. y Andreani, S., 2010. Restrictive definition of asbestos and the assessment of potential health hazards: insights from Northern Chile. International Geology Review, 52, 955-963.

Pidwirny, M., 2011. Soil. The Encyclopedia of Earth, http://www.eoearth.org/article/Soil

Profesor en Línea, 2011. Historia de la Geometría. http://www.profesorenlinea.cl/geometria/GeometriaHistoria.htm

Rossiter, D.G., 2005. Proposal for a new reference group for the World Reference Base for Soil Resources (WRB): the Technosols, http://www.itc.nl/*rossiter/research/suitma/UrbWRB2006v2.pdf.

Save the Elbe, 2003. Ok Tedi Environment – Impacts. http://www.rettet-die-elbe.de/oktedi/environ2.htm

Siegel, J., 1997. Ground Water Quantity. En: Marcus, J.J., Mining Environmental Handbook, Effects of Mining on the Environment and American Controls on Mining, Imperial College Press, London, pp. 164-168.

Smedley, P.L. y Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry, 17, 517-568.

Smith, K.S., 1999. Metal sorption on mineral surfaces: an overview with examples relating to mineral deposits. En: Plumlee, G.S. y Logsdon, M.J. (Eds.), The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Reviews in Economic Geology, vol. 6A. Society of Economic Geologists, Chelsea, Michigan, 161-182.

The Ravenwood Organization, 2011. Greenhouse gas reduction programs. http://ravenwoodorg.org/ggrprogram.aspx

US EPA, 1998. Locating and estimating air emissions from sources of arsenic and arsenic compounds. US Envioronmental Protection Agency, http://www.epa.gov/ttnchie1/le/arsenic.pdf

USGS, 2001. A laboratory manual for X-Ray powder diffraction. U.S. Geological Survey, updated Open-File Report 01-041. http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clay.htm

Weil, R. y Chen, G., 2009. Alleviation of soil compaction by Brassica cover crops. Dr. Ray Weil's Research Group: Current Graduate and Undergraduate Students, http://www.enst.umd.edu/people/Weil/ResearchGroup.cfm

Wikipedia, 2011a. Lake Nyos. http://en.wikipedia.org/wiki/Lake_Nyos

Wikipedia, 2011b. Ozone. http://en.wikipedia.org/wiki/Ozone

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., y Alley, W.M., 1998. Ground water and surface water: A single resource. USGS Circular 1139., http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/

Younger, P.L., Banwart, S.A. y Hedin, R.S., 2002. Mine Water, hydrology, pollution, remediation. Environmental Pollution (Vol. 5) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 464 pp.

Fuentes de las imágenes (a Noviembre de 2011)

1. http://elviroarandaalvarez.blogspot.com/2010/05/madrid-contaminado.html
2. http://elcapitalino.com/index.php?id=nota&seccion=ciudad&ide=1452
3. http://www.eltabacoapesta.com/el-tabaco/ley-antitabaco-espanola/carteles-de-senalizacion-de-espacios-libres-de-humo-ley-antitabaco-espanola/#Carteles_Castellano_MSC
4. http://www.thedailygreen.com/weird-weather/weather-categories/pollution-pictures/1610
5. http://www.tuverde.com/2009/05/alerta-ambiental-en-chile-restriccion-vial-y-prohibicion-del-uso-de-lena/
6. http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/earth/atmosphere.html
7. http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=50028&origen=notiweb
8. http://www.visitnorway.com/es/Articulos/Articulos-tematicos/Que-hacer/Atracciones/Atractivos-naturales-de-Noruega/La-magia-de-las-auroras-boreales/
9. http://www.woodlandtrust.org.uk/en/why-woods-matter/woods-carbon/Pages/greenhouse-effect.aspx
10. http://calentamiento-global-1.blogspot.com/2011/01/efecto-invernadero.html
11. http://www.surreybeekeeper.co.uk/2010/09/12/the-waggle-dance/
12. http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/2546563.stm
13. http://www.elpais.com/articulo/internacional/contaminacion/devora/Santiago/Chile/elpepuint/20070525elpepuint_3/Tes
14. http://www.geo.arizona.edu/geo5xx/geos577/projects/kayzar/html/lake_nyos_disaster.html
15. http://www.pocketburgers.com/2008/12/deadly-gas-cheap-power.html
16. http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/oceancolor/additional/science-focus/ocean-color/science_focus.shtml/sahara_dust.shtml
17. http://www.taringa.net/posts/imagenes/11121673/Fotografias-de-Volcanes-en-Erupcion_.html
18. http://www.k12science.org/curriculum/airproj/pm_size.html
19. http://volcanoes.usgs.gov/images/pglossary/ash_more.php
20. http://www.energydigital.com/company-reports/jef-drill-blast
21. http://www.flickr.com/photos/rocbolt/2741899839/#/
22. http://todosloscaminoshaciati.blogspot.com/2010/10/chile-minas-abandonadas-ii-andacollo-un.html
23. http://ravenwoodorg.org/ggrprogram.aspx
24. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/Ammonium_nitrate-fuel_oil_%28ANFO%29_explosive.jpg
25. http://geology.isu.edu/Digital_Geology_Idaho/Module7/Bunker-Hill_aerial_photo_smelter_1984.jpg
26. http://www.flickr.com/photos/lukas_y2k/3295418985/in/photostream
27. http://www.airliners.net/aviation-forums/tech_ops/read.main/304489/
28. http://www.lyyn.com/news/newsletter/newsletter2006_02.html
29. http://stefan-ritz.ch/weblog/chile-2010/santiago-de-chile-stadtleben/
30. http://digitalitis.com/cooking/main.php?g2_view=slideshow.Slideshow&g2_itemId=3299
31. http://astro-etwinning.blogspot.com/ http://www.markelowitz.com/lunwater.htm
32. http://raymondwiggers.homestead.com/SoilsGallery.html
33. http://www.ldeo.columbia.edu/users/menke/slides/talamanca07/talamanca07_44.html
34. http://web1.beverlyhg-h.schools.nsw.edu.au/Faculty/Science/MCINERNEY/year%209/greening%20australia/salinity.jpg
35. http://www.science.unsw.edu.au/news/climate-variability-not-land-clearing-main-trigger-of-salinity/
36. http://www1.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL4FSCOHumificacion.htm
37. http://gmg.unizar.es/asignaturas/GeoquimicaAplicada
38. http://www.terragis.bees.unsw.edu.au/terraGIS_soil/sp_exchangeable_cations.html
39. http://www10.aeccafe.com/blogs/arch-showcase/tag/colorado/page/2/
40. http://travel.webshots.com/photo/2433952310026337420NYflFt
41. http://www.forestryimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=5377117
42. http://www.albaiges.com/ingenieros/05roma01.htm
43. http://www.dashe.com/blog/social-learning/whos-building-the-social-learning-roads
44. http://www.minbase.com/joomla/index.php?option=com_igallery&view=category&id=3&Itemid=116
45. http://www.flickr.com/photos/lonqueta/5693056387/#/
46. http://www.uvm.edu/~gdrusche/AMD%20description.html
47. http://www.abc.net.au/news/2007-11-15/vic-energy-supply-safe-despite-flood-crisis/726256
48. http://blogs.agu.org/mountainbeltway/category/sediment/page/2/
49. http://www.gwpc.org/CallToAction/AbandonedMines.aspx
50. http://mandgoa.blogspot.com/search/label/Rivona)
51. http: www.rocscience.com/ hoek/corner/17_Blasting_damage_in_rock.pdf
52. http://www.travelpod.co.uk/travel-blog-entries/ mkford/1/1250360000/tpod.html
53. http://www.gardguide.com/index.php/Chapter_4
54. http://www.sciencelearn.org.nz/Contexts/Digestion-Chemistry/Sci-Media/Images/Cubes-of-food
55. http://www.ucm.es/info/crismine/Ambiente_Serena/Tema_As.htm

4. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO Y CORRECCIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

4.1 Proyectos mineros y el estudio de impacto ambiental

4.1.1 Definiendo algunos conceptos básicos

Hasta ahora hemos pasado lista y analizado las diferentes formas en que la actividad minera puede afectar al medioambiente. En esta sección nos centraremos en cómo impedir o mitigar dichos impactos ambientales. Esto se debe realizar (aunque no ocurre así en todos los países) a través de un análisis que consta de "dos" partes principales (Oyarzún y Oyarzun, 2011):

1. Un "estudio de impacto ambiental". Este estudio constituye la primera fase del proceso y lo realiza la empresa del proyecto o bien una consultora contratada por dicha empresa. En él se analizan y estiman todos los probables impactos de la actividad propuesta sobre el medio y la sociedad.
2. Una "evaluación de impacto ambiental". Esta evaluación analiza el estudio de impacto ambiental. Esta es la fase del análisis que en un país "serio" es realizada por un organismo regulador del gobierno central o regional, dependiendo de las competencias estatutarias.

No basta con que una empresa indique cuales serán los diferentes impactos potenciales y como se impedirán o mitigarán, tiene que haber además un agente a escala estatal o regional (el regulador) que certifique si dicho estudio es correcto o que aspectos necesitan ser revisados. Aquí nos centraremos en el "estudio de impacto ambiental", es decir, el análisis que debe realizar la empresa sobre los potenciales impactos que generará la actividad minera.

Dependiendo de la legislación de cada país, el estudio de impacto ambiental puede requerir además de otro, esto es, de un "plan de cierre de la actividad minera", lo que normalmente se inserta en el concepto de sostenibilidad de la actividad. Si bien es cierto que una vez agotadas las reservas de mineral la actividad minera ha de cesar, no lo es menos que la comunidad que dependía de dicha actividad debe tener derecho a un futuro aceptable. Esto es importante ya que en el pasado el cierre de complejos minero-metalúrgicos ha sido en muchos lugares del mundo un suceso particularmente traumático tanto en términos sociales como económicos y ambientales.

Por otra parte, si bien es cierto que la extracción de minerales no puede ser clasificada como parte del desarrollo sostenible en un sentido estricto (*s.s.*) del término, tampoco lo es menos que la actividad extractiva sí puede (y debe) aspirar a la "compatibilidad" con un desarrollo sostenible (*s.l.*). Por ejemplo, mediante la explotación de un recurso no renovable de tal modo que genere beneficios a largo plazo (ambientales — sociales — económicos) que igualen o superen los valores que existían antes de la explotación (Amezaga et al., 2011).

4.1.2 El estudio de impacto ambiental: aspectos generales

El estudio de impacto ambiental es un concepto amplio que analiza a través de parámetros cuantitativos y cualitativos el estado del medioambiente antes, durante, y después de la actividad minera propuesta. Es importante resaltar el concepto temporal-continuo que posee este estudio, que implica el estado del medioambiente "antes", "durante", y "después" de la actividad minera. Esto significa en términos prácticos, que los proponentes de la actividad deberán predecir los cambios que se producirán y sugerir medidas correctoras que impidan o mitiguen en lo posible los inherentes trastornos que serán causados, incluyendo un plan que permita restaurar el medio físico y biológico (lo más cercanamente posible) a su estado original.

Prácticamente cada país (y en ocasiones las subdivisiones político-administrativas de éstos: Estado, Comunidad Autónoma, Provincia, Municipio) puede poseer su propia legislación medioambiental, lo cual significa que los estudios de impacto ambiental serán evaluados de diferente manera dependiendo del énfasis que las instituciones pongan sobre diferentes aspectos de la actividad minera. Así, aquí ofreceremos una versión general, de carácter genérico sobre el tema.

Para que podamos seguir adecuadamente el orden de esta sección debemos aclarar primero lo siguiente. En minería moderna, la recopilación de datos ambientales debe comenzar desde la misma etapa de exploración. Sería deseable que incluso antes de comenzar una campaña de exploración se descartaran zonas por su especial valor biológico o cultural. Además deberían descartarse aquellas zonas en las cuales, se haga lo que se haga, se impactará al medioambiente de manera decisiva e irremediable. Especial atención debería ponerse en aquellas regiones montañosas y con selva tropical. Es durante esta etapa de exploración en que debería comenzar el estudio de "línea base" (*baseline*), el cual puede ahorrar a la empresa costosas "sorpresas" ambientales o culturales posteriores.





Grasberg (arriba) y Ok Tedi (abajo), dos minas de cobre-oro (que "nunca" debieron serlo) localizadas en la Cordillera Central de la isla de Nueva Guinea. Se trata de proyectos mineros que han causado una auténtica devastación ambiental; estas minas están situadas a gran altura y se enfrentan a enormes problemas con los residuos de mina en un paisaje y clima complejo. Este escenario industrial-medioambiental se ve agravado por la existencia de ecosistemas ricos, tanto en altura (montaña fría) como en las tierras bajas (bosque húmedo tropical). La situación ambiental es tan mala en Papúa Nueva Guinea, que incluso la compañía minera que explota la mina de cobre Ok Tedi reconoce que un promedio de 90 Mt (millones de toneladas) por año de residuos y escombros se descargan al río Ok Tedi (OK Tedi Mining, 2008). Cerca de 50 millones de toneladas de estos materiales alcanzar el río Fly, que tiene un impacto significativo en el sistema fluvial. Zonas tropicales y montañosas: pésima combinación para poner en marcha un proyecto minero (imágenes[1,2]).

En el estudio de impacto ambiental debemos distinguir al menos tres apartados principales:

1. La investigación de línea base, es decir, una "auditoría" del "estado del medioambiente", antes de que empiece la actividad minera. Es posible e incluso deseable incluir aquí otros aspectos de la región, como por ejemplo aspectos sociológicos.
2. Un segundo apartado correspondiente a la descripción y análisis de los potenciales impactos ambientales derivados del proyecto minero (análisis predictivo) y su prevención-mitigación.
3. El tercero consiste en un plan de rehabilitación y uso final del terreno (= planes de cierre), para lo cual son fundamentales las conclusiones obtenidas en la investigación de línea base.

Environmental Baseline Studies

A comprehensive understanding of the physical, chemical, and biological environment provides the foundation to a well-executed Environmental Assessment. Knight Piésold provides our clients with a full complement of technical experts able to conduct required baseline and specialized studies in the areas of aquatics, flora and fauna, hydrology, hydrogeology, meteorology, air quality, water quality, and geochemistry (acid rock drainage and metal leaching prediction).

The detailed baseline characterization is used as input to model possible project impacts, which allows our environmental specialists to provide timely input to project designs to reduce potentially adverse environmental impacts. This in turn produces a more socially and environmentally sustainable project and enhances the efficiency of the project permitting process.

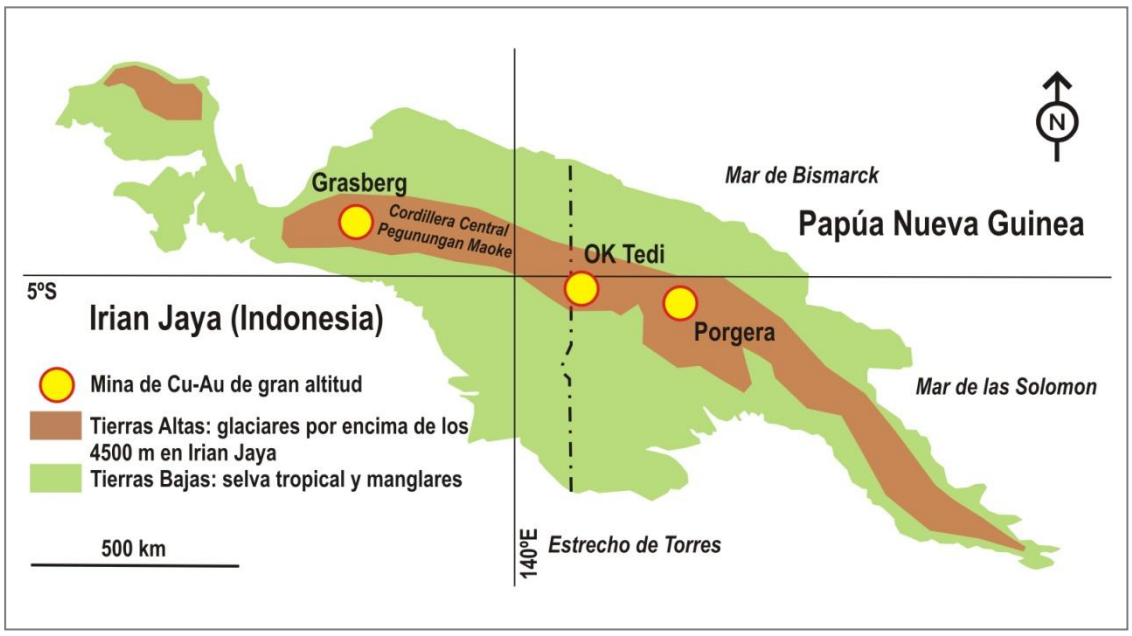
Knight Piésold Consulting (2011)

Como hemos comentado anteriormente en esta obra, los proyectos mineros son diferentes a los del resto de las actividades industriales en dos aspectos principales:

1. La localización de una mina viene predeterminada por la localización del recurso mineral explotable. Podemos construir una fábrica en el mejor sitio posible bajo el punto de vista ambiental, sin embargo una mina tiene una sola localización posible: encima de la masa mineral. Esto es lo que se denomina "valor localizado" de un recurso mineral.
2. El comienzo de la actividad minera viene precedido por un largo proceso de exploración regional y evaluación local. Este proceso puede tardar varios años.

En la actualidad una compañía minera con intenciones serias de establecerse y desarrollar actividades mineras en una región deberá empezar a recabar datos ambientales de línea base durante la fase de exploración. El estudio de línea base permitirá desarrollar un marco de referencia para poder controlar adecuadamente los cambios medioambientales generados durante y después de la actividad minera. Para esto, claro está, la investigación de línea base tiene que ser realizada "antes" de que la actividad en cuestión haya afectado significativamente el medioambiente, es decir, nunca más allá de la fase de sondeos para la estimación

de tonelaje del depósito, y en lo posible antes de la fase del estudio de factibilidad económica. Dicho en palabras simples, la línea base nos permite conocer cuál es la situación ambiental de una determinada zona o región "antes" de que la actividad minera introduzca modificaciones en el ambiente.



Sobre el "valor localizado" de un recurso mineral. La isla de Nueva Guinea y principales minas de Cu-Au en altura; adaptada de Higueras et al. (2011). Resulta difícil de creer que empresas mineras decidieran explotar los yacimientos de Grasberg, Ok Tedi y Porgera para causar (ex profeso) un desastre ambiental. Aquí ocurrió lo siguiente: 1) no existía (en la práctica) ninguna restricción ambiental importante, ni en Indonesia ni menos aún en Papúa Nueva Ginea; 2) los yacimientos estaban donde estaban, esto es, en el peor lugar posible; 3) hasta comienzos de los años 1990's la preocupación minero-ambiental era entre escasa y nula.

Los aspectos a considerar en una investigación de línea base son diversos y en algunos casos complejos. La importancia de unos y otros variará en función de las características del proyecto minero, el medio donde se desarrollará, y por supuesto, la legislación ambiental del país o región en cuestión.

Por ejemplo no será lo mismo desarrollar un proyecto minero en una árida y remota región (por ejemplo, el Desierto de Atacama; Chile) que hacerlo en un entorno lleno de bosques, lagos, y vida en general (p.ej., la Columbia Británica, Canadá). De cualquier manera, aun las regiones áridas del planeta albergan algún tipo de vida, y en algunos casos pueden constituir ecosistemas únicos. El que un geólogo o un ingeniero no sean capaces de reconocer dichos hábitats no significa que no existan, de ahí que resulte vital contar con otros profesionales, por ejemplo, botánicos o zoólogos, para el estudio de línea base. Por su parte, es difícil que un biólogo sea capaz de diferenciar suelos, o una roca de otra, o el grado de fracturación de una región, aspectos también de gran importancia en el estudio ambiental. Por ejemplo, las rocas o suelos carbonatados pueden neutralizar

soluciones ácidas y por lo tanto frenar la dispersión de metales pesados puestos en solución.



Geólogos y biólogos, profesionales complementarios en los estudios de línea base (imágenes[3,4]).

Además y dependiendo de las circunstancias, por ejemplo, la región del mundo donde se pretende realizar una explotación minera, la presencia de un antropólogo puede ser crucial para hacer las cosas bien. Se trata de explotar yacimientos, no de ofender pueblos gratuitamente porque nos puedan parecer primitivos en sus hábitos y asuntos religiosos.

4.1.3 Las diferentes secciones formales de un estudio de impacto ambiental

Un típico estudio de impacto ambiental en minería suele incorporar los apartados (Oyarzún, 2008):

- Un informe "Ejecutivo" o de Síntesis. Se trata de un informe destinado al conocimiento de personas que necesitan tomar decisiones pero carecen del tiempo y conocimientos técnicos para una lectura pormenorizada (p.ej. miembros del cuerpo de directores de la empresa, autoridades públicas, legisladores, etc.). El informe ejecutivo debe destacar los aspectos principales (impactos mayores, temas conflictivos, conclusiones).
- La descripción del área de influencia. Debe presentarse una "línea base" del área, informando sobre sus aspectos físicos, biológicos, socio-económicos y culturales de manera que permita comprender los factores ambientales que será necesario contrastar con las actividades del proyecto. La pertinencia, claridad y precisión de esta sección del informe es esencial, resguardando una longitud que haga posible su lectura en el atareado mundo de hoy.
- Una descripción del proyecto. Debe ser la adecuada para comprender sus objetivos, recursos y envergadura. Sus componentes, materias primas,

operaciones, tecnologías, desechos y efluentes deben ser descritos de forma precisa. De esta manera el lector informado puede comprender e incluso deducir las acciones que pueden causar impactos ambientales. También debe existir precisión respecto a posibles impactos positivos del proyecto en términos de generación de empleo para la población local. Igualmente importante es lo referente a la sustentabilidad económica del proyecto.

- Las metodologías de evaluación de impactos. Los métodos seguidos para detectar y evaluar aspectos e impactos ambientales deben ser descritos y su uso justificado, explicando su campo de utilidad y sus limitaciones. Esto es especialmente importante respecto a los modelos utilizados.
- Los impactos del proyecto. Los impactos ambientales, socio-económicos y culturales evaluados deben ser expuestos, incluida su importancia y magnitud de manera justificada. También pueden exponerse aquí las medidas de corrección, mitigación o compensación propuestas.
- La evaluación de alternativas. Si el proyecto cuenta con flexibilidades, en términos de ubicación, magnitud, tecnología, etc., deben ser expuestas, así como el grado en que contribuyen a corregir o mitigar algunos impactos y los posibles impactos alternativos que implicaría su adopción.
- Un programa de vigilancia ambiental. En esta parte se describen los programas de monitoreo destinados a asegurar que las variables de mayor peso ambiental se mantienen dentro de límites aceptables, así como los procedimientos a utilizar para corregir sus desviaciones.
- A esto deberíamos agregar el “plan de cierre y uso final del terreno”, que no siempre está presente en las etapas de estudio y evaluación de impacto ambiental. Este plan debería centrarse en las materias esenciales, entendiendo que es imposible prever (absolutamente) el estado final de una explotación minera (Oyarzún, 2008).

4.2 La investigación de línea base

La “línea base” es uno de los apartados más trascendentales de un estudio de impacto ambiental. Difícilmente podremos hablar de “impactos” si no sabemos lo que había “antes” de que empezara la actividad minera. Los siguientes son los temas principales a considerar durante la investigación de línea base.

4.2.1 Paisaje

En términos de su importancia relativa, por ejemplo, zonas de reconocida belleza, tengan o no la categoría de reserva, parque nacional o regional. En estos últimos casos resulta obvio que la zona tendrá un nivel de protección a través de la legislación vigente que prohibirá o restringirá las actividades mineras. De cualquier manera se trata de un tema altamente subjetivo, sobre todo si tomamos en cuenta la percepción (positiva o muy positiva) que los habitantes de una región puedan tener sobre sus paisajes. ¿Alguien piensa que su entorno es feo? Más bien todo lo contrario, y lo piensa en plan “*mi” valle es mucho más bonito que “tu” valle*.



¿Cómo le asignamos un “valor” al paisaje en España? A la izquierda, Alto Tajo (Guadalajara); a la derecha, Rodalquilar (Almería). ¿Cuál es más bonito? ¿Cuál requiere mayor protección?

Sumemos a esto el contexto religioso de un determinado paraje. Para muchas religiones animistas, un bosque o una montaña pueden ser “mucho más” que un bosque o una montaña. Estos son temas muy importantes que requieren de un tratamiento específico para evitar roces innecesarios con un pueblo o cultura local.

Un clásico en este sentido fue el descubrimiento de oro en las Black Hills de Dakota (1874), en tierras sagradas que pertenecían a los Sioux. Uno puede decir que estas cosas pasaban porque, en fin, eran “otros” tiempos. Desgraciadamente no es así, y el Siglo XX estuvo plagado de desprecios y codicia por parte de algunas compañías mineras que bien no sabían o no les importaba el valor espiritual que pudieran tener unas tierras para los pueblos locales.

De esta manera, el análisis de un determinado paisaje tiene que ir más allá de la estética, y detenerse además en el valor religioso, incluso sentimental, que esas tierras puedan tener para los habitantes locales.



Las Black Hills (izquierda) y la derrota de Custer y el 7º de Caballería en Little Big Horn (1876). El General G.A. Custer había liderado el grupo que comprobó la existencia de oro de las Black Hills en 1874 (imágenes[5,6]).

4.2.2 Hábitat

Hábitat es aquel territorio que presenta unas condiciones ambientales determinadas y que está poblado por un conjunto de seres vivos para los que tales condiciones son las adecuadas. En general se suele utilizar este término para una especie en concreto y la gente suele asociarlo más a los animales que a las plantas.



La Cordillera Cantábrica, hábitat del oso pardo en España (imágenes[7,8]).

Paszkowski (2011) explica que los ecólogos (no confundir con "ecologistas", que en realidad son "conservacionistas") son aquellos profesionales que pueden medir las condiciones ambientales en que una especie se desarrolla normalmente, para definir así con mayor rigor su hábitat específico. Así, un hábitat propiamente tal puede ser definido en términos de su régimen de temperatura, la disponibilidad de luz y agua, el ambiente químico (acidez, salinidad), y la magnitud de las fuerzas físicas (p.ej., oleaje, viento). Las especies pueden variar substancialmente en el conjunto de condiciones ambientales que toleran y pueden clasificarse como generalistas de hábitat flexibles o especialistas de hábitat estrecho.

El ecólogo G.E. Hutchinson (1903 –1991) desarrolló un concepto relacionado que denominó “nicho” (de ahí el término “nicho ecológico”) de las especies, que es un "espacio vital" delineado por toda la gama de condiciones ambientales que un organismo puede tolerar y por todos los recursos que necesita para su supervivencia, crecimiento y reproducción. El nicho de una especie es donde vive y lo que hace. Un cactus, una tarántula, y un correcaminos pueden compartir un hábitat común en el desierto, pero cada uno ocupa un lugar único (Paszkowski, 2011).

De esta manera, el reconocimiento biológico de una región puede ser complejo, largo en el tiempo, y caro, pero vale la pena. Como nota ilustrativa, valga aquí referirnos a *Taxus brevifolia* (*Pacific Yew* o Tejo del Pacífico) una conífera nativa del noroeste del Pacífico en Norteamérica. Lo importante de esta planta radica en que fue a partir de ella que se sintetizó un medicamento, el Taxol, usado en quimioterapia para tratar diversos cánceres.



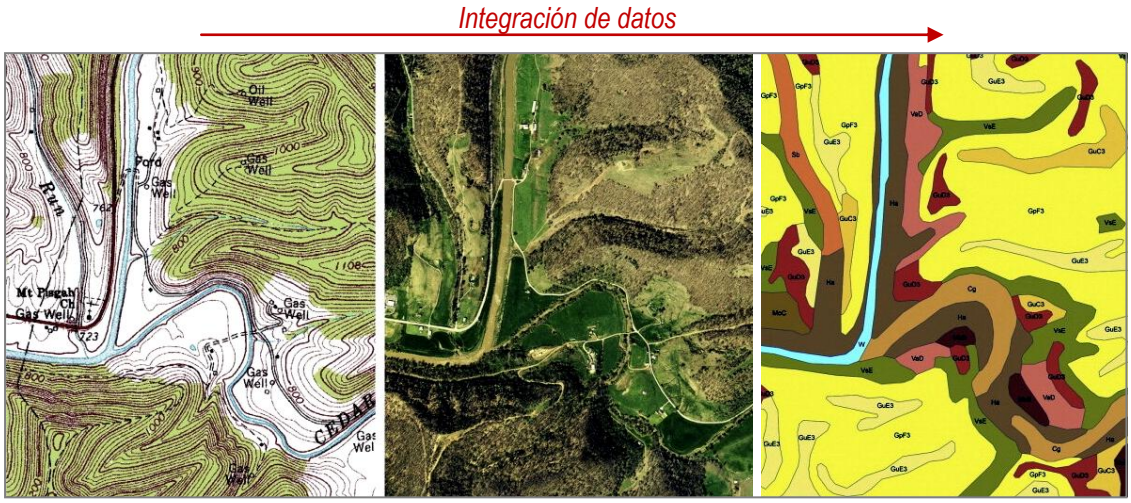
Taxus brevifolia y el medicamento Taxol (imágenes[9,10]).

4.2.3 Suelos

Se deberá contar con una adecuada caracterización de los suelos que permita prever los problemas que puedan derivarse de la infiltración de efluentes mineros (p.ej., drenaje ácido con metales pesados). Recordemos que no todos los suelos responden de igual manera a la infiltración de contaminantes. No hay que pensar “si” algún suelo será contaminado durante la actividad minera sino que en que extensión podría ocurrir, cuán a menudo, y cuáles serían los daños asociados.

De acuerdo a la US EPA (2011), la contaminación del suelo en minería se puede originar por una variedad de causas que pueden ir desde los procesos naturales, pasando por los accidentes y finalmente los actos intencionados. Las actividades

que puedan dar origen a la contaminación pueden ocurrir durante la actividad minera, después de ésta, y por causas que incluyen la eliminación de residuos, vertidos accidentales, vertidos ilegales, fugas en tanques de almacenamiento subterráneos, fenómenos tormentosos e inundaciones, etc.



Generación de un mapa de suelos usando la cartografía topográfica, pasando por el análisis de una ortofoto y la producción del mapa de suelos con datos de campo. Adaptada de Hodza (2010).

Debemos recordar que los suelos contaminados por sustancias químicas tóxicas pueden ser lixiviados, y los compuestos que de ahí salgan pueden acabar en las aguas subterráneas y cercanas a la superficie, donde estos materiales pueden ser absorbidos por las plantas y los animales, contaminar el suministro de agua potable, o volatilizarse. Una vez que la contaminación del suelo migra hacia los cursos de agua, los contaminantes también pueden acumularse en los sedimentos, situación que puede ser muy difícil de remediar, y puede afectar los ecosistemas locales y la salud humana.

4.2.4 Flora y Fauna

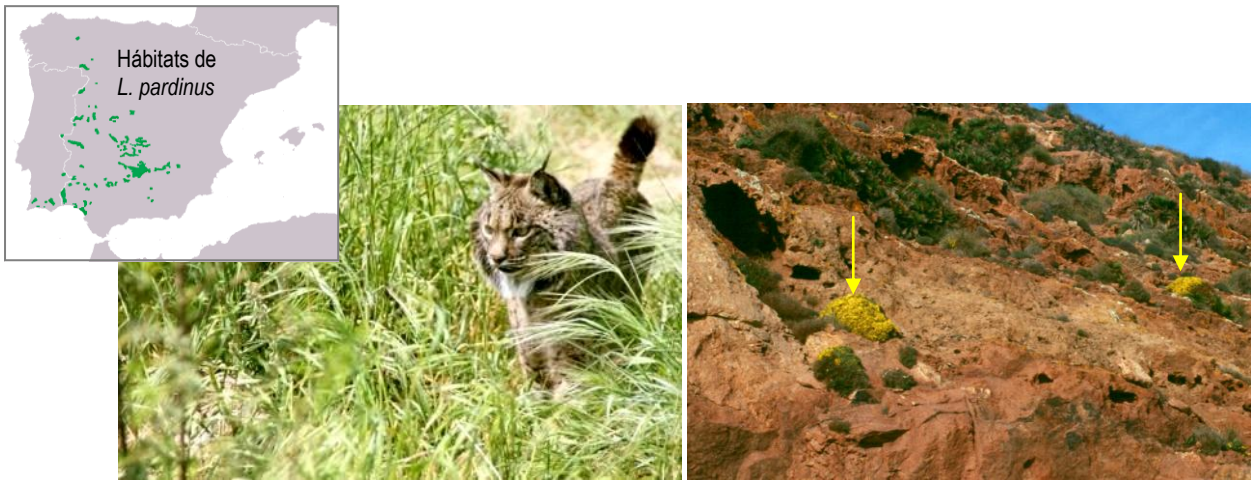
Aquí debemos realizar inventarios florísticos y faunísticos, poniendo especial énfasis en aquellas especies que reciben una especial protección por estar en peligro de extinción. Esta es la parte peligrosa de muchos estudios ambientales para proyectos mineros o energéticos ya que la tentación de tirar de datos que están en la red o en centros de investigación es grande. El problema radica en que esos datos pueden no corresponder específicamente a la zona de estudio. Cuando se cuenta con biólogos de campo que van a la zona todo va bien, pero si esto no es así, los peligros de errores graves están al acecho. Al respecto, Oyarzún y Oyarzun (2011) relatan el caso del estudio de impacto ambiental que realizó BP en el Golfo de México (previo al tristemente célebre incidente de la plataforma Deepwater Horizon). Parte, del "estudio" estaba "copiado" de páginas web del

NOAA, y se hizo sin mostrar ningún esfuerzo por determinar la aplicabilidad al caso del Golfo de México. Se llegó al extremo de suponer la existencia de "morsas" en aguas tropicales (Graham y Reilly, 2011):



Un caso de deshonestidad manifiesta, definitivamente las morsas "no" habitan el Golfo de México (imágenes[11,12]).

¿Un caso excepcional? En este sentido, más de uno ha oído hablar de cómo las listas de plantas o animales de una determinada localidad o región se obtienen "sin más" de manera rápida de cualquier publicación, folleto o Internet. Al respecto, y por si hubiera alguna duda al respecto, no se empieza por un catálogo o lista (o Internet), sino que se va al campo, se realiza un estudio, y después se confirman los hallazgos con fuentes fidedignas, como pueden ser los herbarios y de instituciones serias.



Por otra parte, si un proyecto minero fuera a desarrollarse en algún hábitat del lince ibérico (Lynx pardinus) (imágenes) o en uno de los últimos reductos de la planta Ulex canescens (flechas), dos especies en peligro de extinción en la Península Ibérica, esto tendría que quedar perfectamente explicitado en el informe (imágenes[13,14]).

4.2.5 Calidad del aire

La calidad del aire es un parámetro importante en cualquier tipo de minería que se vaya a realizar. Como hemos visto en el Capítulo 3 la minería contribuye al deterioro de la atmósfera con:

- Polvo (particulado aéreo), sobre todo si la explotación minera es a cielo abierto y existe un importante tráfico rodado.
- Gases, si la metalurgia tiene alguna fase de fundición de sulfuros. Lo mínimo esperable son gases oxidados de azufre; en el peor de los casos deberíamos añadir particulado aéreo de arsénico (si se funden minerales como enargita o tennantita) o mercurio gas (si la mena es cinabrio).



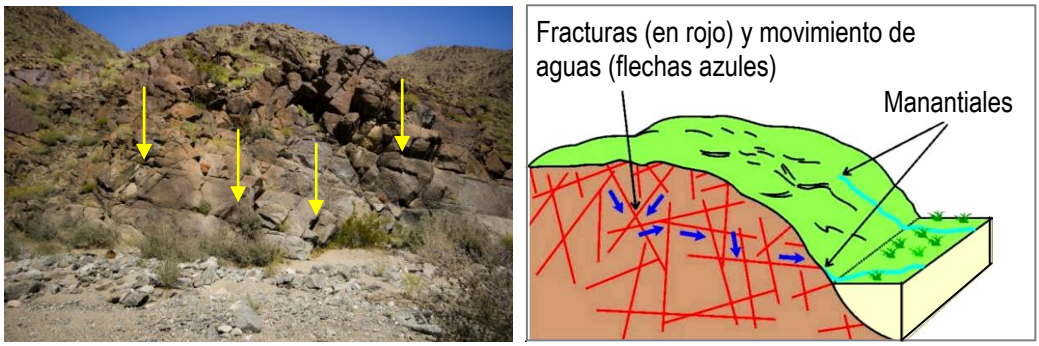
Las fundiciones de Chuquicamata en Chile (izquierda) y Sudbury en Canadá (derecha) (imágenes[15,16]).

De esta manera es importante medir e indicar qué gases tóxicos (si los hubiera) pudieran estar presentes antes de la puesta en marcha del complejo minero-metalúrgico, y el tipo y densidad del particulado aéreo.

4.2.6 Clima, orografía, rocas y fracturación

La dispersión de metales y metaloides en el medio es un tema complejo en el que intervienen diversas variables empezando por el clima. Un clima cálido acelera los procesos químicos que llevan a la dispersión de metales, uno frío los ralentiza. Abundantes lluvias pueden promover remociones en masa de rocas mineralizadas y suelos ricos en metales pesados, pero las soluciones químicas serán más diluidas. Los fenómenos se acrecentarán en las montañas por el gradiente altitudinal, aunque el clima más frío tenderá a ralentizar las reacciones químicas. En fin, que hablamos de un complejo mundo para el que no hay respuestas fáciles. Por otra parte, y como sería de esperar existen factores geológicos que influyen de manera importante en la dispersión de metales pesados, y a veces de manera decisiva:

1. La intensidad de la fracturación, a escala local y regional. Mientras más fracturada esté una zona más fáciles serán los procesos de erosión y por lo tanto de remoción. Así, la cubierta de un yacimiento es desmontada rápidamente y los procesos de oxidación-lixiviación actúan rápida y efectivamente. Por tanto, a la dispersión de metales por fenómenos inducidos-favorecidos por la actividad extractiva y metalúrgica, habrá que sumar una dispersión de metales anterior a la minería. Esto hará por otra parte que la línea base geoquímica para determinados metales sea más alta que lo normal en los cursos fluviales aledaños. Si esto no se establece en el estudio de línea base, luego la empresa minera podrá ser acusada de contaminar los cursos de agua.



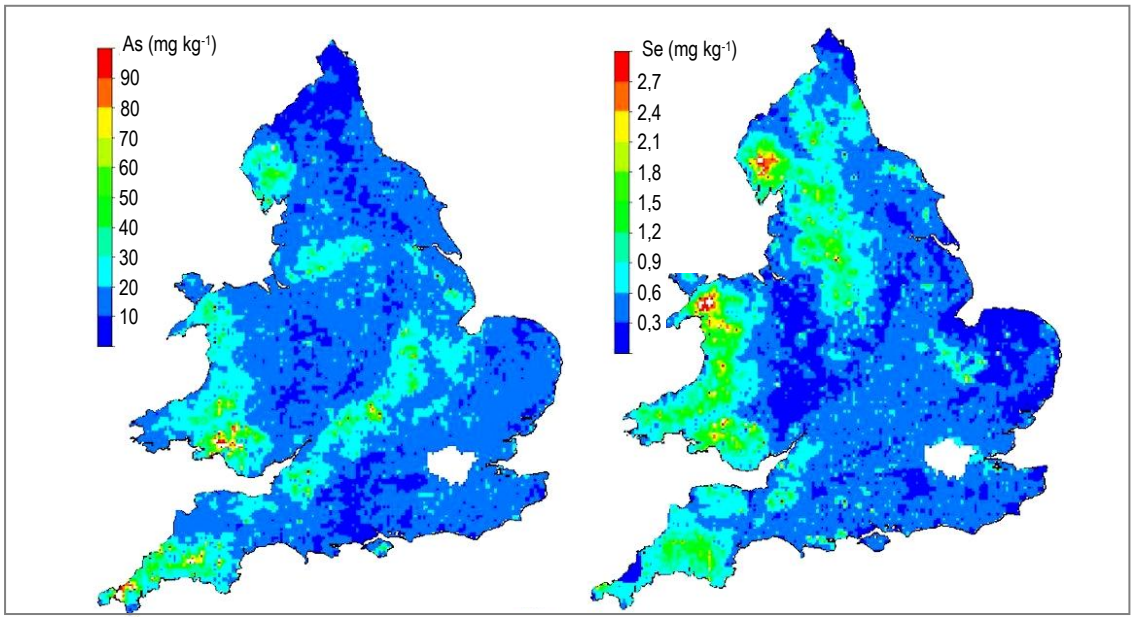
Las aguas (contaminadas o no) fluyen más fácilmente por un macizo de rocas fracturado. Mientras más fracturas, más fácil el movimiento de estas aguas. A la izquierda se muestran algunas fracturas indicadas con flechas amarillas (imágenes[17,18]).

2. Dado que la acidez de la soluciones es la pieza clave para la lixiviación de los metales y metaloides, la litología del encajante controla parte del proceso. No es lo mismo una caliza (que tamponará las soluciones ácidas) que una roca ígnea. En este último caso la posibilidad de tamponar las soluciones depende de la presencia abundante de feldespatos, los cuales reaccionan con una solución ácida neutralizándola al menos en parte. Si esto es así, la dispersión de metales se verá reducida.
3. La alteración hidrotermal. Como expresamos en el punto anterior los feldespatos son la única barrera que existe entre una lixiviación masiva y otra (naturalmente) controlada. Las alteraciones hidrotermales de tipo potásica y propilítica (pórfidos cupríferos) mantendrán la mineralogía feldespática del encajante. Así, cuando comience la oxidación de la pirita, el ácido reaccionará con los feldespatos neutralizando las soluciones. Por el contrario, la alteración hidrotermal argílica avanzada (típica de los yacimientos epitermales de alta sulfurización) destruirá los feldespatos, y cuando la pirita comience su oxidación en el ambiente supergénico no habrá ningún mineral que pueda neutralizar efectivamente las soluciones. Esto favorecerá fuertemente la lixiviación de metales pesados y metaloides.

Todo es interactivo y cambiante, de ahí que no existan dos casos iguales. Incluso si nos desplazamos tan solo unos pocos kilómetros en una faja metalogénica las condiciones de dispersión de metales pueden cambiar drásticamente. De ahí la importancia de reflejar adecuadamente en el estudio de línea base las variables mencionadas en este apartado, para luego poder valorarlas adecuadamente en el estudio de impacto ambiental.

4.2.7 Geoquímica

Deberemos conocer las características químicas del medio, poniendo especial énfasis en los suelos, sedimentos fluviales y aguas. Este es uno de los apartados de mayor importancia, ya que sin estos datos no podernos saber si la concentración de un metal o metaloide ha subido con el paso del tiempo durante la fase productiva. Para esto pueden ser muy útiles los mapas geoquímicos elaborados durante la etapa de exploración del yacimiento, o mejor aún, contar con mapas geoquímicos regionales como los elaborados por el Servicio Geológico Británico (BGS) (NERC, 2011).



Mapas geoquímicos regionales de suelos en Inglaterra y Gales generados por el BGS. A la izquierda arsénico, a la derecha, selenio. Adaptada de NERC (2011).

Por otra parte, aunque contemos con valores regionales, siempre será útil, tanto para el operador (la empresa) como para el regulador (Estado) conocer específicamente las concentraciones de metales pesados en la zona donde se desarrollará el proyecto minero. Para esto los mapas geoquímicos de exploración pueden ser de gran utilidad y deberían ser incorporados al estudio de línea base.
Lo dicho para los suelos se aplica de la misma manera a los sedimentos fluviales y aguas. En este sentido, hay que tener claros cuales son elementos de riesgo de dispersión de metales. Por ejemplo, resulta a veces obvio mediante una mera

inspección ocular que hay zonas que serán conflictivas, porque de hecho "antes" de empezar la explotación minera, ya lo eran. ¿A qué nos referimos con esto? Pues a aquellas zonas con abundante dispersión de drenaje ácido, que se manifiesta en el campo por la presencia de vivos colores rojos y amarillos.



Si un yacimiento mineral ha podido generar tal volumen de limonitas, derivadas del drenaje ácido "natural", imaginemos lo que se podrá generar durante la explotación minera si no se toman medidas (y muy serias) de tipo preventivo (imágenes[19,20]). Esto es particularmente preocupante si el yacimiento es además rico en arsénico.

Aspectos específicos sobre la geoquímica de aguas de superficie y subterráneas incluyen los siguientes:

- La extensión y morfología de la cuenca de drenaje (área de la que reciben agua una corriente y sus tributarios).
- Las características químicas de los cursos de superficie y lagos.
- Las características químicas de las aguas subterráneas.
- Las variaciones estacionales del nivel freático.
- La productividad de los pozos de agua.

4.2.8 Usos del suelo

Este apartado se refiere a la actividades que se realizan en el entorno de lo que será el proyecto minero (mina más instalaciones de tratamiento de minerales). Actividades tipo que pueden tomar lugar en una zona son:

- Agricultura.
- Ganadería.
- Usos recreacionales.
- Cercanía a núcleos urbanos.

Como cualquiera podrá imaginar, sólo aquellos proyectos mineros que se desarrollen en áreas remotas quedarán exentos de entrar en conflicto con alguna de estas actividades.

La minería trajo riqueza a muchas regiones en el mundo, lo cual significó que en las proximidades de los núcleos mineros se fundaron ciudades. Pero las ciudades hay que alimentarlas, por lo cual además de crearse centros urbanos también se desarrollaron, por ejemplo, actividades ganaderas y agrícolas, sobre todo cuando las minas estaban en sitios remotos y las comunicaciones no eran buenas. Esta situación fue un clásico en muchos parajes remotos de los Estados Unidos o Chile, solo por mencionar un par de ejemplos. No ocurrió así en Europa, donde la densidad poblacional era ya muy alta en el Siglo XIX.



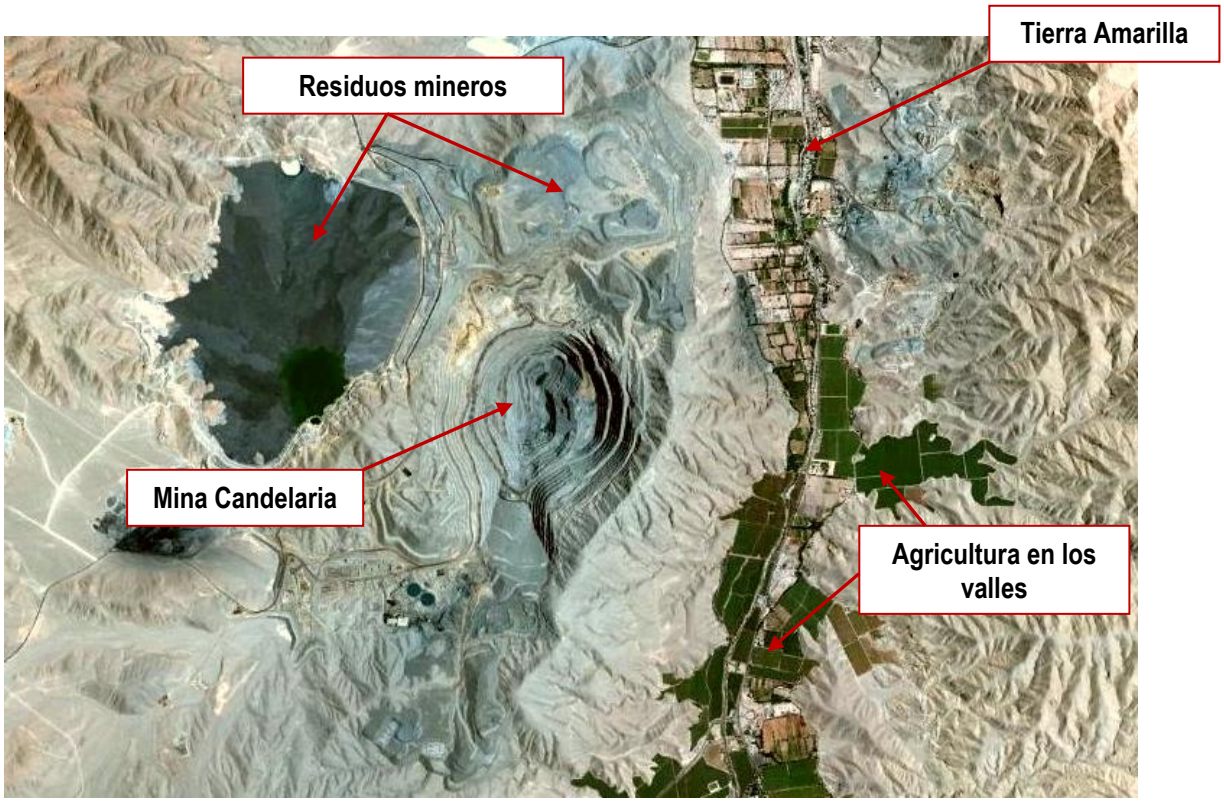
Minas Carmen y Dayton, Distrito Minero de Andacollo (Chile). Coexistencia entre actividades mineras y núcleos urbanos (Andacollo) en un limitado espacio. La imagen Google Earth cubre unos 3,7 km a lo ancho; norte hacia arriba.

El caso es que en regiones mineras puede haber "más" yacimientos minerales que los conocidos, y en ese sentido, estas regiones suelen ser exploradas de manera exhaustiva (proyectos de exploración tipo *bronwfield*). Así, distritos que datan del Siglo XIX pueden recobrar vida con nuevos descubrimientos, aunque claro está, habrá que tomar en cuenta los núcleos poblacionales y otras actividades que allí se desarrollen.

Una de estas campañas en Chile en el viejo Distrito Minero de Punta del Cobre (Copiapó) dio como fruto el impresionante descubrimiento de Candelaria en 1987

(Freeport-McMoRan, 2011). Pero claro, Copiapó es algo más que minas, también existe una importante agricultura que se desarrolla en los valles aledaños, a pesar de las condiciones desérticas del lugar. La agricultura se realiza mediante sistemas de regadío para el cultivo intenso de viñedos, en los que se cosecha las más tempranas uvas de exportación del país.

En lo que respecta a la actividad agrícola, el 80% de la uva de exportación se encuentra en la comuna de Tierra Amarilla, justo en las inmediaciones de la mina de Candelaria:



Mina Candelaria, Distrito Minero de Punta del Cobre, Copiapó (Chile). Coexistencia entre actividades mineras y agrícolas en un limitado espacio. La imagen Google Earth cubre unos 9,6 km a lo ancho; norte hacia arriba.

En este sentido, Candelaria fue la primera compañía en la Región de Atacama en llevar a cabo voluntariamente estudios de impacto ambiental "antes" de empezar las operaciones. Estos estudios permitieron a la empresa obtener autorizaciones ambientales a partir de 1992. La compañía llevó a cabo un estudio detallado de la gestión de los residuos sólidos, lo que lleva al control y minimización de los impactos ambientales negativos de la operación. Además, la compañía supervisa continuamente la calidad del aire, suelo y agua. También ha firmado acuerdos con escuelas y universidades para realizar investigaciones y seminarios conjuntos (Castillo et al., 2011). En la actualidad Candelaria es hoy en día líder en la conservación del agua, de su recuperación y reciclaje en todos sus procesos. Se convirtió en la primera operación minera en el mundo en certificar todas sus instalaciones bajo las normas ISO 14001 (InfoMine, 2011).

4.2.9 Ciencia y Cultura

Aquí entran aquellas zonas que puedan poseer algún valor paleontológico, arqueológico, antropológico, etc. Cuando hablamos de "algún" valor no nos referimos al hecho, por ejemplo en paleontología, de que las rocas contengan fósiles.

Fósiles los hay a puñados, lo importante aquí es "de qué" fósiles hablamos. Entre otras cosas deberíamos considerar lo siguiente ¿se trata de un afloramiento crítico para entender un determinado episodio geológico o un proceso evolutivo? Sitios con esas características serían entre otros el del Burgess Shale, en la Columbia Británica (Canadá), o el de las pisadas de homínidos de Laetoli (Tanzania) (ver caja a la derecha). Se trata de preservar lo que "deba" ser preservado, no cualquier cosa.

Pero qué duda cabe de que este es un tema conflictivo, y bien lo saben los constructores de obras civiles en ciudades con una historia importante. A la menor excavación aparecerán vestigios de un pasado remoto, una muralla, una calzada, una villa, etc. Entonces, la pregunta siempre será qué y porqué algo debe ser preservado.

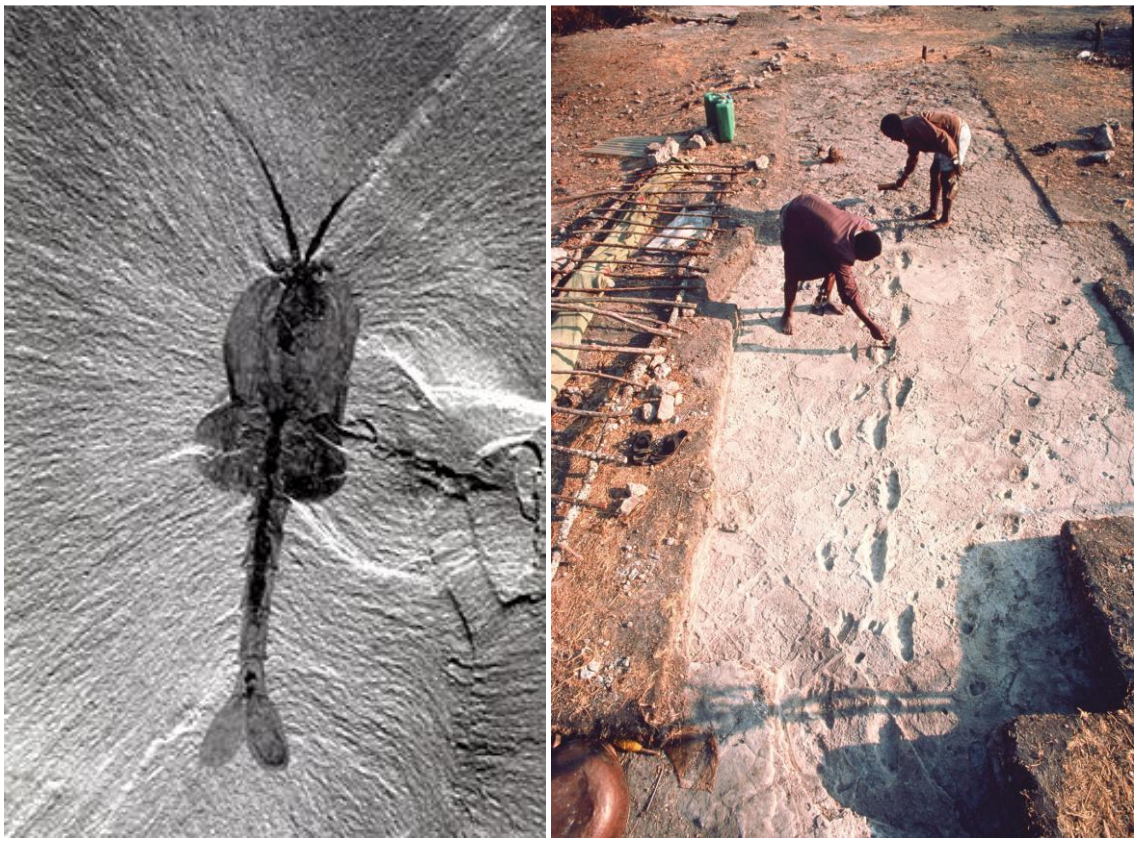
***The Burgess Shale** is an exceptional Middle Cambrian age (about 540 million years ago) fossil locality located in Yoho National Park in the Rocky Mountains, near Field, British Columbia, Canada. The locality is special because of the soft-bodied preservation of a wide diversity of fossil invertebrate animals. The locality has been intensely studied since its discovery in 1909 by Charles Walcott, and has been declared a World Heritage Site. A popular introduction to the Burgess Shale can be found in Steven J. Gould's book, "Wonderful Life".*

MacRae (2011)

*By 3.5 million years ago at least one hominin species, A. afarensis, was an adept walker. In addition to anatomic evidence from this time, there is also a 27.5-metre (90-foot) trackway produced by three individuals who walked at a leisurely pace on moist volcanic ash at **Laetoli** in northern Tanzania. In all observable features of foot shape and walking pattern, they are astonishingly similar to those of habitually barefoot people who live in the tropics today. Nevertheless, although the feet of the Laetoli hominins appear to be strikingly human, one should not assume that other parts of their bodies were as similar to ours.*

Tuttle (2011)

Están quienes considerarán que prácticamente cualquier cosa debe ser preservada, aunque la ley no siempre estará de su parte. Lo que sí puede ocurrir es que una obra quede paralizada mientras un grupo de arqueólogos o geólogos documentan el material encontrado en el lugar durante las excavaciones. No solo las ciudades tienen ruinas ocultas por el tiempo, también pueden aparecer en cualquier lugar donde haya habitado una determinada cultura.

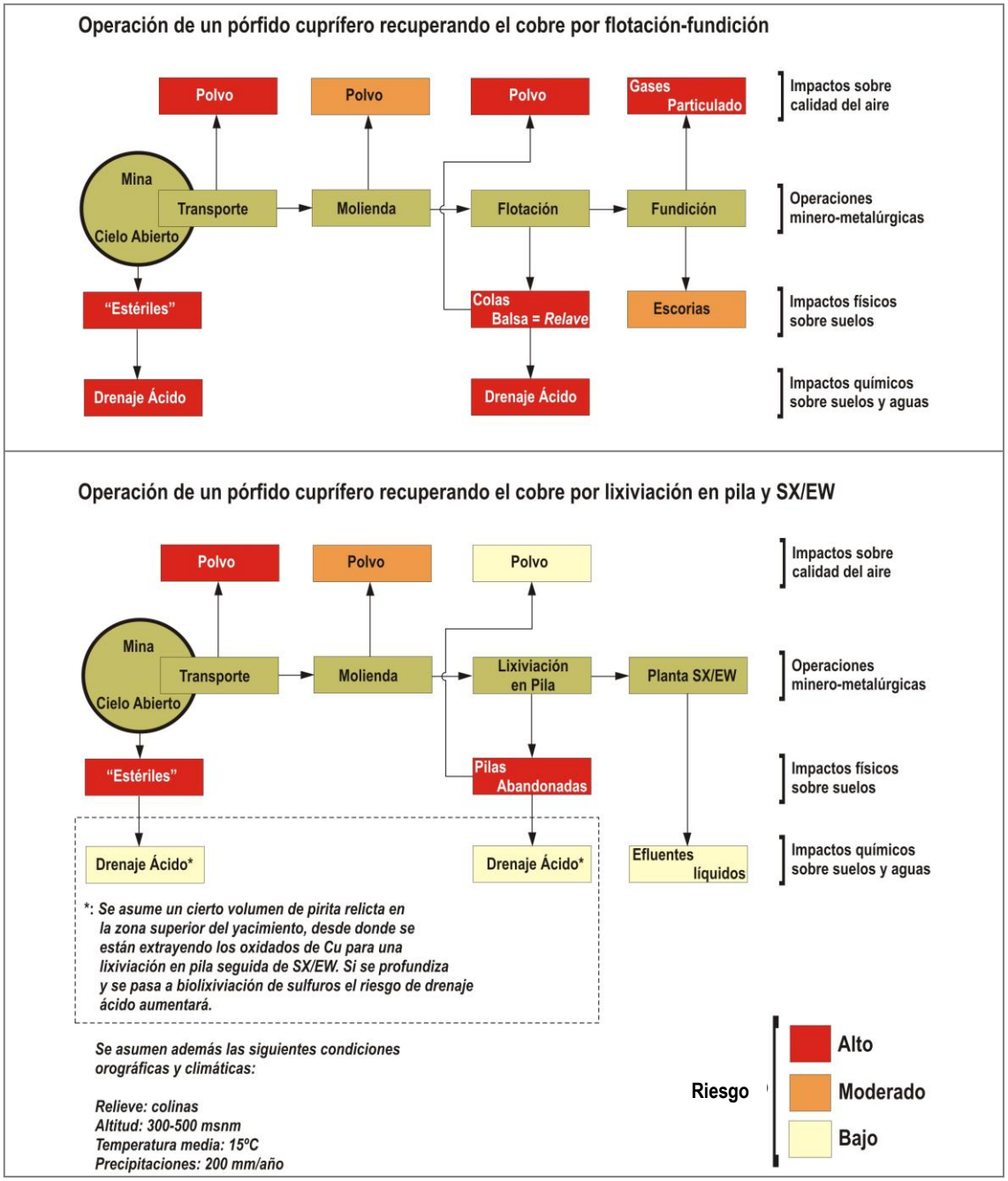


A la izquierda, fósil de Waptia fieldensis (Cámbrico Medio) del Burgess Shale (Smithsonian National Museum of Natural History, 2011); a la derecha, huellas de Australopithecus afarensis, afloramiento de Laetoli (Tanzania). Foto: John Reader, en: Tuttle (2011).

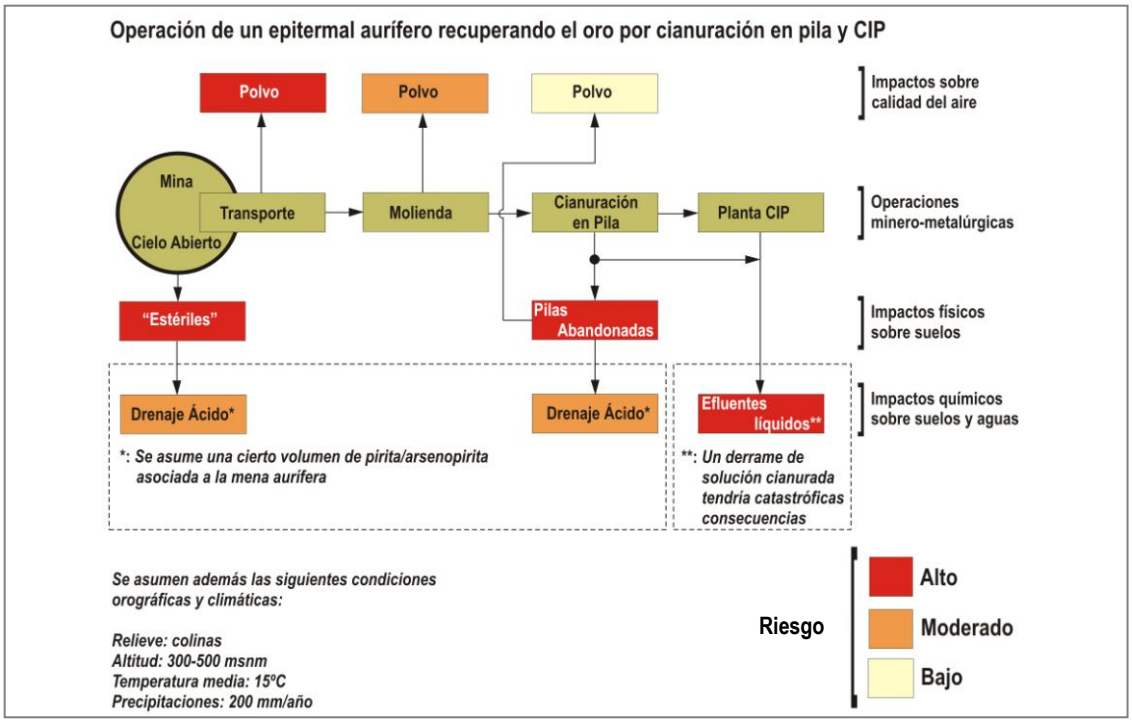
4.3 La "lista" de impactos ambientales potenciales de un proyecto minero

4.3.1 Proyectos mineros e impactos

Por definición todo proyecto minero causará un severo impacto en una zona, pero esto depende en gran medida de las características del proyecto (y de la zona). Veamos tres ejemplos:



Esquema simplificado de análisis de riesgos asociados a la operación de un yacimiento tipo pórfido cuprífero. Arriba, mediante metodología extractivas convencionales; abajo mediante lixiviación en pila y SX/EW (extracción por solventes y electro-recuperación).

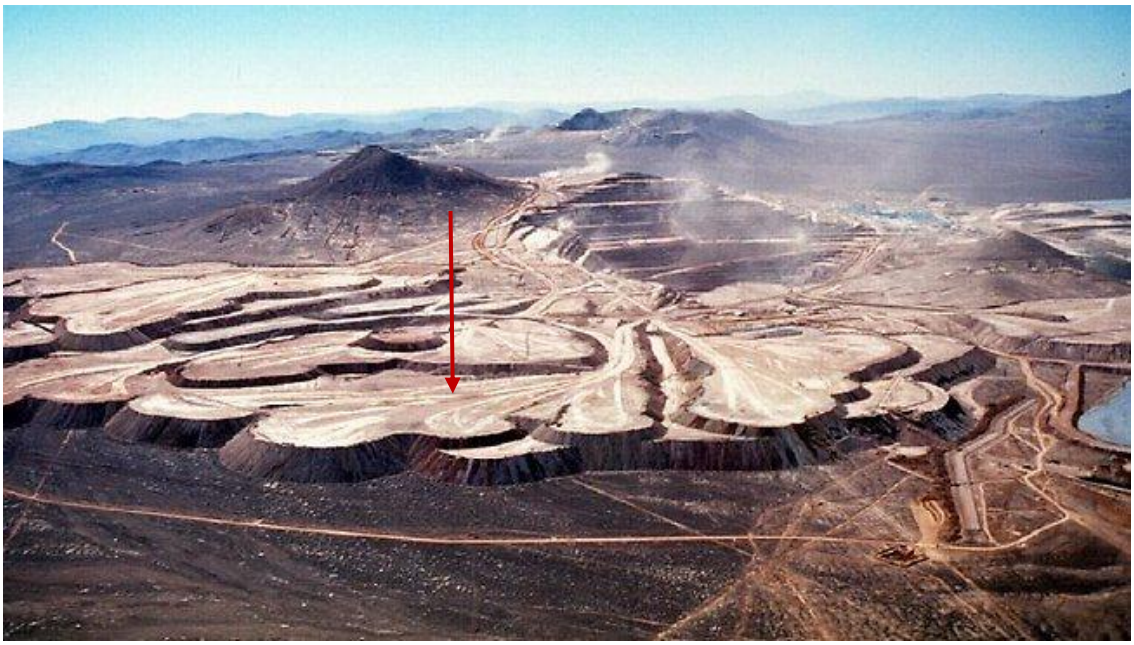


Esquema simplificado de análisis de riesgos asociados a la operación de un yacimiento tipo epitermal aurífero mediante cianuración en pila y CIP (Carbon-in-Pulp).

En los capítulos anteriores hemos revisado los principales problemas derivados de la minería, pero ésta es diversa en lo que respecta a los minerales que se extraen y los métodos de explotación. Por ello resulta cuasi imposible ponernos en todos los casos, que pueden ir desde una humilde gravera localizada junto a un río, hasta un complejo minero-metalúrgico que trata diariamente unas 100.000 toneladas de mineral al 0,8% Cu.



Izquierda, una gravera en el Río Jarama (Madrid) ocupando un área de unos 6 km^2 versus el complejo minero-metalúrgico de Chuquicamata (Chile) con un área (sin contar con RT) de unos 88 km^2. Imágenes Google Earth.



Mina Escondida (imagen[21]). Observar las dimensiones de las escombreras (flecha). Afortunadamente esta mina está localizada en una región desértica de Chile (Atacama) y no existen núcleos poblacionales que puedan verse afectados.

Por otra parte, tampoco es lo mismo que el proyecto minero se localice en una cadena de montañas cerca del Ecuador o se encuentre en una planicie de una región desértica. No hablamos tan solo de clima sino también de la flora y fauna que pueden ser afectadas. Huelga decir que en el primer caso los problemas serán abundantes, empezando por la imposibilidad física para acomodar los residuos mineros, seguido por el desarrollo de lluvias torrenciales, y la gigantesca dispersión de contaminantes, por vías físicas (como material en suspensión en los cursos fluviales) y químicas (como especies catiónicas o iones complejos). A esto deberíamos añadir los impactos sobre la flora y fauna y las culturas locales que habitan en esos parajes.



Situaciones orográficas, climáticas y biológicas contrastadas, donde los impactos de un proyecto minero serían muy diferentes. Arriba las Montañas Foja en Nueva Guinea; abajo, el Plateau Hammada al Hamra en Libia (imágenes[22,23]).

De cualquier manera, el estudio de impacto ambiental (Oyarzún y Oyarzun, 2011) tiene que ofrecer una visión organizada de las variables “mineras” y sobre todo,

sobre “qué” impactarán dichas variables. Hablamos de las interacciones entre las acciones del proyecto y el ambiente físico, biológico y humano en el que éste se implantará. En el caso de un gran proyecto minero estas interacciones (más sus efectos indirectos y de retroalimentación) pueden llegar a ser casi infinitas. De ahí que sea imprescindible “filtrarlas”, basándose en los conocimientos disponibles, la experiencia y el buen criterio (e intuición) por parte de los evaluadores. Desde luego, esto no es fácil y normalmente se realiza al analizar la matriz de acciones del proyecto frente a los factores ambientales. A esto le sigue un segundo filtrado, al determinar qué aspectos serán considerados como “impactos ambientales” (negativos o positivos). La selección de los impactos ambientales, realizada en la etapa del estudio de impacto ambiental implica que dicho análisis incluye ya una primera evaluación, que será seguida en el mismo estudio por una jerarquización, según los criterios que el mismo estudio defina. Esta selección es independiente de la que una vez completado el estudio (realizado directamente o por encargo del proponente del proyecto) realizará la respectiva agencia del gobierno, esto es, la “evaluación de impacto ambiental”.

Una de las metodologías clásicas de estudio se realiza mediante la llamada “Matriz de Leopold” (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Esta matriz sitúa los factores o variables ambientales en el eje vertical, agrupados según su naturaleza: a) física o química; b) biológica; c) ecológica; d) cultural. En el eje horizontal se sitúan las actividades del proyecto.

Medio	Componente ambiental	Parametro	Explotación																Beneficio				Com.	
			Ingenio		Canaleta		Arrastre		Caranchera		Balsa		Chupadera		Shute		Draga		Amalgamación		Refogado		Refogado final	
Físico	Suelo	Deforestación	B	M	M	M	M	M	M	M	M	M	A	M	A	M	M	M	MB	MB	MB	MB	MB	MB
		Erosión	B	M	M	M	M	A	M	A	M	A	A	A	A	A	M	A	MB	MB	MB	MB	MB	MB
		Inundación	B	B	B	B	B	B	MB	MB	MB	MB	A	A	A	A	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
		Calidad del suelo	B	B	B	M	B	M	B	B	B	B	A	A	A	A	B	B	B	M	A	A	A	M
	Clima	Microclima	B	B	B	M	B	M	B	B	B	B	M	M	A	M	B	B	MB	MB	B	B	B	B
	Atmósfera	Calidad del aire	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	B	M	B	MB	MB	B	MB	A	A	A	A
		Ruido	B	MB	B	MB	B	MB	B	MB	M	MB	A	M	A	M	M	MB	MB	MB	B	MB	B	MB
	Agua	Grava	M	M	M	A	M	A	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	MB	MB	MB	MB	MB	MB
		Sedimentos	M	A	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	MB	MB	MB	MB	MB	MB
		Alteración cauce	B	M	B	B	M	B	A	M	A	M	M	M	M	M	M	M	MB	MB	MB	MB	MB	MB
		Calidad del agua	M	A	M	A	A	A	A	A	A	A	M	M	M	M	A	M	B	M	M	M	M	M
	Paisaje	Modificación	B	MB	B	MB	M	B	M	MB	M	M	A	B	A	B	M	M	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Biológico	Flora	Acuática	B	MB	B	B	M	M	A	M	A	M	A	B	A	B	A	M	B	B	A	M	A	M
		Terrestre	B	MB	B	B	B	B	M	MB	B	MB	A	A	A	A	B	MB	B	B	A	M	A	M
	Fauna	Acuática	B	B	B	B	B	B	M	B	M	B	A	A	A	A	M	B	B	B	A	M	M	M
		Terrestre	B	MB	B	B	B	B	M	MB	B	MB	A	A	A	A	B	MB	B	B	A	M	A	M
Socio-económico	Población	Salud	M	MB	M	M	M	M	M	M	M	M	A	M	M	B	B	B	A	M	A	M	A	M
		Crecimiento poblac.	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	A	M	A	M	B	B	B	B	B	B	B	B
	Territorio	Uso de la tierra	B	MB	B	MB	M	MB	B	M	B	M	A	A	A	A	B	MB	B	MB	M	MB	M	MB
	Economía	Actividad tradicional	B	MB	B	MB	M	MB	M	MB	M	MB	A	MB	A	MB	A	MB	B	MB	B	MB	B	MB
	Cultura	Cambio cultura nativa	M	MB	M	MB	M	MB	M	MB	A	MB	A	MB	A	MB	A	MB	M	MB	M	MB	M	MB

Ejemplo de una Matriz de Leopold para los efectos de la minería artesanal del oro en Madre de Dios (Perú). Primera Columna: Impacto; Segunda Columna: Mitigación; A: Alto; M: Moderado; B: Bajo; MB: Muy Bajo. Tomada de Mosquera et al. (2009).

Cada intersección corresponde a una celda, para la cual se verifica si existe efectivamente una intersección factor ambiental/acción del proyecto, y si esta implica un impacto ambiental (con consecuencias negativas o positivas). Si ese es el caso, se valora la magnitud e importancia del impacto, lo que se expresa por dos números separados por una línea oblicua en la misma celda. Por magnitud se entiende la extensión del impacto, que puede medirse en términos de una superficie, volumen, porcentaje, etc. (p.ej., la superficie de suelos afectados). En cambio, la importancia es más valorativa y se refiere al aprecio que merece el factor afectado (p.ej., las aguas de un río de reconocida calidad química y pureza). Además, se pone un signo negativo a las celdas que impliquen impactos negativos. Este método ha sido muy utilizado en Chile en estudios de impacto ambiental de proyectos mineros, con distintas variaciones, y en combinación con otros como los modelos de dispersión.

4.3.2 Analizando los problemas en relación al estudio de impacto ambiental

La mina y sus instalaciones, que generan *per se* un impacto visual casi inevitable. A menudo la visión de una mina y sus instalaciones es el único contacto que tiene la gente con la actividad minera (por ejemplo, desde una carretera). Así, el estudio de impacto ambiental deberá dejar claro cuál será la extensión de dicho impacto y las medidas correctoras que se adoptarán.



Cuando las relaciones entre personas y minas van más allá de un vistazo rápido desde la carretera. La localidad de Butte (Montana) y el Berkeley Pit (la corta o rajo de Berkeley). El color rojo del "lago" no es un fallo fotográfico, sino que drenaje ácido de mina (imágenes[24,25]).

Por otra parte, por definición las actividades mineras impactarán negativamente en la flora y fauna. Aun si la actividad minera es subterránea afectará a la fauna debido a la presencia humana, maquinaria, movimiento de vehículos, o ruido. El informe deberá evaluar dichos impactos y explicar las medidas correctoras.

La gestión de las aguas es otro de los puntos esenciales del estudio, y deberá contemplar los siguientes aspectos:

- Control de escorrentías y procesos erosivos.

- Capacidad de almacenamiento de agua para las actividades de mina y planta de tratamiento de minerales.
- Minimización del impacto causado por la extracción de aguas subterráneas.
- Prevención de la contaminación por efluentes mineros de las aguas subterráneas y superficiales.

Este es un tema de primera importancia en regiones desérticas o semidesérticas. Por ejemplo, en el desértico norte de Chile las empresas mineras están optando por la construcción de plantas desaladoras de agua de mar para satisfacer sus crecientes necesidades de agua para los diferentes procesos mineros.

Candelaria planea construir planta desaladora en Punta Padrones - Chile

La cuprífera chilena Minera Candelaria, controlada por la empresa con sede en Phoenix Freeport-McMoRan Copper & Gold, planea construir una planta desaladora para abastecer sus operaciones en la III Región, en el norte del país, anunció en un comunicado. La compañía ya está realizando estudios sobre los planes de construcción, y agregó que la decisión se tomó luego de conocer las nuevas reservas descubiertas en su operación a cielo abierto, lo cual permitirá ampliar la vida útil de la mina en nueve años hasta el 2026.

La empresa no dio a conocer el monto que se invertirá, dado que aún está trabajando en el presupuesto necesario para seguir adelante con el proyecto. La planta se construirá en el puerto Punta Padrones, de propiedad de la empresa, ubicado en la bahía de Caldera, en la III Región. Está diseñada para entregar 300 l/s de agua desalinizada y, una vez que comience a operar, permitirá a la empresa reducir la extracción de agua del acuífero del río Copiapó.

Business News Americas (2010)

Este es un tema que afecta de manera importante a la flora y fauna, no solo por la reducción de la disponibilidad de agua sino por la contaminación de la misma, cosa que también afectará a los pescadores y a quienes dependen de dicha pesca. Lo mismo debe decirse con respecto a la agricultura y por lo tanto, a los agricultores que dependen de este medio de subsistencia

El ruido y las vibraciones pueden ser un factor importante si las operaciones mineras se desarrollan cerca de núcleos urbanos. Si esto es así, la voladura de rocas puede inducir vibraciones inaceptables para los habitantes del lugar. A este problema debemos agregar el de las ondas de choque generadas por las explosiones. De acuerdo a ELAW (2010) las vibraciones pueden estar asociadas con muchos tipos de equipos usados en las operaciones mineras, pero las voladuras son consideradas como la fuente principal. La vibración afecta la estabilidad de infraestructuras, edificios y casas de las personas que viven cerca de una explotación a cielo abierto. Los mismos autores señalan que de acuerdo a un estudio de la Unión Europea (MINEO Consortium, 2000), las sacudidas y vibraciones como resultado de las voladuras asociadas a la minería pueden producir ruido, polvo y el colapso de estructuras en las zonas habitadas de los alrededores. La vida animal, de la cual depende la población local, también puede ser perturbada. Así, el estudio de impacto ambiental deberá entregar datos predictivos de dichos impactos y las medidas correctoras.

Otro factor a considerar, en relación a las vibraciones y la minería subterránea, es la subsidencia del terreno debido al desarrollo de galerías y cámaras de extracción.



Subsidencia del terreno en Indiana debido a la minería subterránea del carbón (Harper, 2011).

En relación al ruido, Passchier-Vermeer y Passchier (2000) indican que la exposición al ruido constituye un riesgo para la salud. Existe abundante evidencia científica de que la exposición al ruido puede provocar problemas de audición, hipertensión, cardiopatía isquémica, trastornos del sueño y disminución del rendimiento escolar.

Por su parte, el sonido se propaga más fácilmente en aire caliente que en el frío, así durante las inversiones térmicas se produce un fenómeno que hace que el sonido viaje más rápido en las capas superiores (cálidas) y se curve hacia abajo, produciéndose un entrampamiento del ruido en los niveles inferiores. Si el viento sopla además de la fuente hacia el receptor el ruido será mayor (Wilkinson Murray, 2010).

El Polvo puede ser un problema serio en regiones áridas y semiáridas si existen centros urbanos en las cercanías de la explotación minera. Pero aún en regiones menos áridas el problema puede ser importante ya que la minería está basada en la excavación para obtener el mineral. Esta acción es seguida por el transporte del mineral, que es la fase que más polvo genera.

La excavación hace desaparecer cualquier cubierta vegetal y el transporte, normalmente por pistas de tierra, genera ingentes cantidades de polvo que de no ser abatidas en el momento, escaparán de la mina y su entorno inmediato. Hablamos en este caso de lo que se denominan “emisiones fugitivas de polvo”. Podemos esperar emisiones de este tipo por las excavaciones, voladuras de roca, transporte de materiales, erosión eólica (más frecuente en minas a cielo abierto), polvo proveniente de las balsas (*relaves*), escombreras y pilas de lixiviación inactivas (ELAW, 2010).

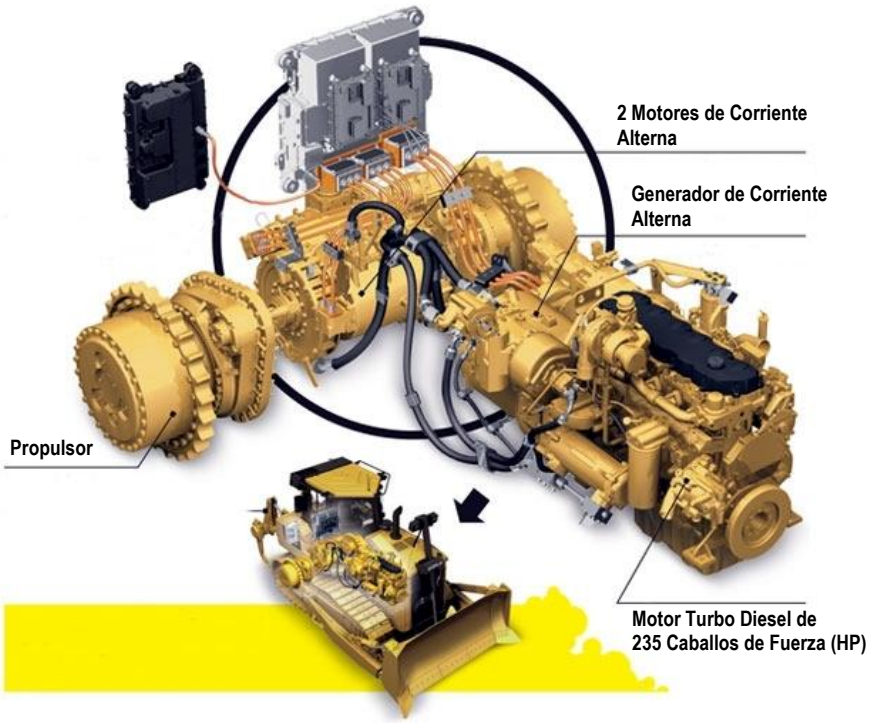
Aunque la composición del polvo condiciona los riesgos a su exposición, ningún tipo es inocuo, ya que la mera exposición crónica a estos materiales supone un riesgo (PRL-ICV-CSCI, 2009). El polvo provoca irritación de las vías respiratorias y, tras exposiciones repetidas y puede dar lugar a una serie de enfermedades, algunas muy graves. Más allá de la salud humana el polvo también afecta a la vegetación. Si las hojas se recubren de polvo disminuye la capacidad de fotosíntesis de la planta. Por otra parte, la obstrucción de los estomas (poros en las hojas) impedirá la absorción de CO_2.



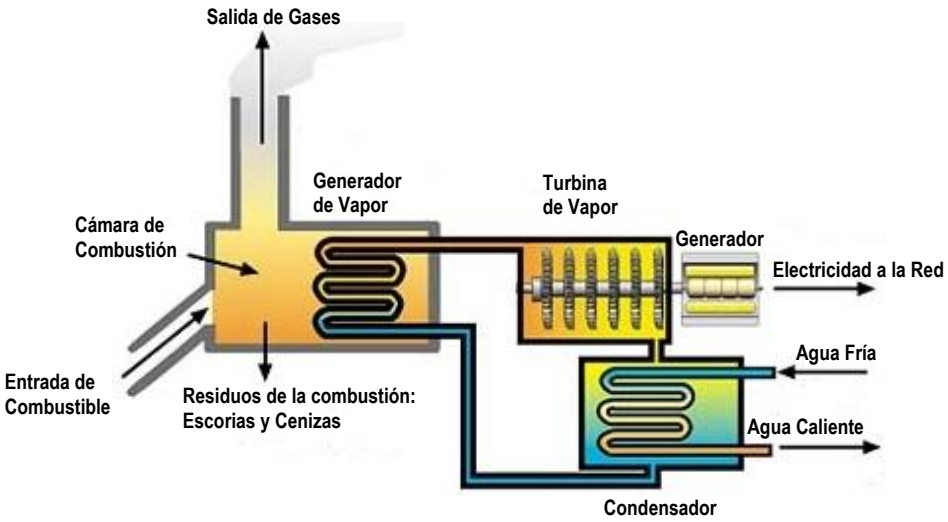
Las principales fuentes de emisión de polvo en minería provienen del tráfico rodado. Transporte de minerales en Alaska (imágenes[26]).

Otras emisiones como la quema de combustibles son también importantes en la minería. Aquí debemos distinguir entre fuentes móviles y estacionarias (ELAW (2010):

- Las fuentes móviles incluyen vehículos pesados usados en las operaciones de excavación, movimiento y transporte de mineral, vehículos de transporte de personal, camiones que transportan materiales necesarios para los procesos mineros y los materiales procesados. Las emisiones de vehículos individuales pueden ser relativamente pequeñas, pero el conjunto de emisiones constituye una materia de preocupación importante. Por otra parte, aun si algunos de los equipos de mina (como una gran pala mecánica) son eléctricos, la electricidad que los mueve proviene de una fuente estacionaria (central eléctrica) que también contribuye a la generación de gases como el dióxido y monóxido de carbono, compuestos del tipo NO_x, etc.
- Las fuentes estacionarias incluyen las emisiones gaseosas de la quema de combustibles en las centrales eléctricas, y las operaciones de secado, tostado y fundición. Las fuentes estacionarias contribuyen de manera muy importante a la "huella de carbono" de la empresa minera, especialmente si las centrales eléctricas queman carbón de bajo rango. En este caso no solo las emisiones de CO_2 serán elevadas sino que además estará el problema de las cenizas volantes, ricas en metales pesados.



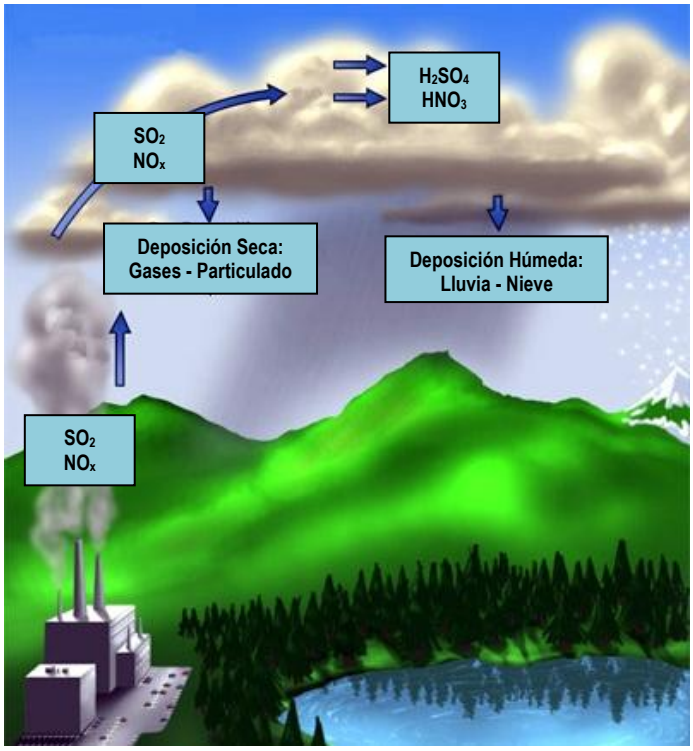
Fuentes móviles. Esquema de un motor diesel-eléctrico, típico de la maquinaria pesada en una mina. En este caso se trata de un bulldozer Caterpillar D7E. Adaptada de Vanderwerp (2010).



Fuentes estacionarias. Esquema de una planta térmica de generación de electricidad (imagen[27]).

***Nota**: Aunque casi todos los procesos de las operaciones mineras representan peligros ambientales, hemos dejado para el final los que a nuestro juicio representan con mucha diferencia los principales, sobre todo por lo irreversible (en muchos casos) de los problemas causados. Nos referimos a los gases oxidados de azufre (más el particulado áereo) generados por las fundiciones de sulfuros metálicos y al importante peligro físico y químico que representan los residuos mineros. En este último apartado insertamos las balsas (relaves) y pilas de lixiviación. A estos deberíamos agregar un tercero, relacionado con el impacto socio-económico de una operación minera, problema que si no es tratado adecuadamente por la empresa puede causar graves trastornos en las poblaciones aledañas.*

Los gases de una planta de fundición de sulfuros como el SO_2 son, con diferencia, uno de los peligros ambientales más serios a los que se tendrá que enfrentar una empresa minera, de ahí que en la medida de lo posible se ha optado por la lixiviación en pila seguida por SX/EW para la recuperación de cobre. El problema está en que mientras esta metodología funciona bien para el cobre, para otros metales (Pb, Zn, Ni, etc.) se necesita seguir con la flotación y fundición. Es en estos casos donde la empresa deberá adoptar medidas importantes para abatir los gases y particulado aéreo emitidos por las chimeneas.





Fundición (abandonada) de cobre en Trail (Canadá).

Camiones mineros en la Columbia Británica (Canadá).



Formación de lluvia ácida en relación con plantas industriales que tratan sulfuros. Dos tipos de gases oxidados: de azufre y nitrógeno. Si bien el dióxido de azufre es producido enteramente por las plantas de fundición, los óxidos de nitrógeno también son generados por los camiones, al romperse el enlace N-N en la cámara de combustión (imágenes[28-30]).

Residuos de origen minero, escombreras, balsas y pilas de lixiviación. Ya sea que la explotación minera para el tratamiento de sulfuros metálicos se desarrolle por métodos convencionales (flotación – fundición) o por lixiviación en pila seguida de SX/EW, lo que es seguro es que se generarán gigantescas cantidades de residuos mineros.

- Las escombreras (*botaderos*) son absolutamente inevitables, ya que por definición en minería a cielo abierto se removerá más "estéril" que roca mineralizada. Entrecomillamos el término "estéril" porque lo que va a parar a una escombrera no es necesariamente roca desprovista de carga mineral, sino que roca con leyes por debajo de la factibilidad económica del proyecto, es decir, por debajo de la "ley de corte" (*cutoff grade*). Lo que es

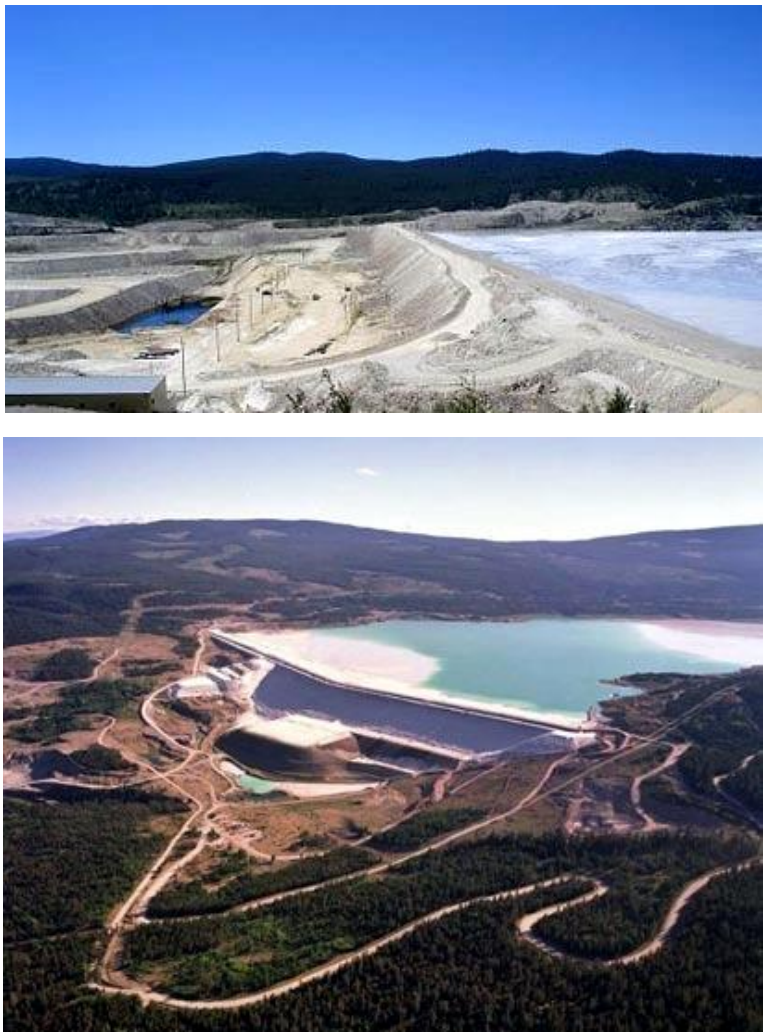
seguro, es que estas rocas tendrán al menos importantes volúmenes de pirita. Ahí empiezan los problemas, ya que es precisamente este mineral el principal causante de los fenómenos de drenaje ácido. El drenaje ácido, aparte de su bajo pH que *per se* es negativo para el ambiente, transporta metales pesados, los cuales añaden un factor extra de riesgo a los efluentes de este tipo. Las cantidades de residuos de escombrera son simplemente inmensas, valga decir como ejemplo que la minería de Chile genera "a diario" 1,6 millones de toneladas de sobrecarga y rocas estériles (J. Wiertz, *com. pers.*). Aparte del peligro ambiental del drenaje ácido está el de la generación de particulado asbestiforme, y por último, aunque no por esto menos importante, las montañas de roca estéril acumuladas se quedarán donde están, ya que resultaría económicamente imposible hacer nada con ellas.



Curioso caso de escombrera (botadero) florida en el Parque Nacional Llanos de Challe (Chile) (imagen[31]). Que ahí crezcan plantas no siginifica nada en positivo, salvo por los valores estéticos. Algunas plantas crecen en ambientes mineros gracias a procesos adaptativos.

- Las balsas (*relaves*) son otro problema serio en la minería de sulfuros metálicos, no solo por su volumen sino porque contienen, junto a los minerales de ganga (silicatos, carbonatos, etc.), los sulfuros que son rechazados durante la flotación. Entre estos destaca la pirita, y con este mineral regresamos al problema de la generación de drenaje ácido. En otras palabras, hablamos de residuos con un potencial para la generación de drenaje ácido. Pero este no es ni remotamente el único problema que presentan las balsas. Las colas salen de la planta de flotación en un estado semi-líquido, y pueden ser transportadas como tal a un depósito muy parecido en su estructura a un embalse. Es decir, estos residuos pueden ser "represados". El problema radica en el hecho de que el dique de contención puede fallar, simplemente por defectos de construcción, por no tomar en cuenta la infiltración de aguas por debajo del mismo, o por una fuerte actividad sísmica. Todos estos casos han ocurrido, y de ahí el peligro

que entrañan, particularmente en las cercanías de pueblos que se localizan aguas abajo del dique de contención. Las balsas pueden ser muy inestables frente al efecto de ondas sísmicas cómo ocurrió en El Soldado (Región de Valparaíso, Chile), con un aluvión de estos materiales que arrasó el pueblo de El Cobre, causando más de 400 muertes en 1965 (Aliste et al., 1966). Por descontado además los efectos (al igual que en el caso de las escombreras) sobre los suelos que las sustentan. Aquí hablamos de problemas físicos (compactación) y químicos (infiltración de soluciones). El volumen, no siendo "tan" grande como en el caso de las escombreras también es significativo, así y por comparación con el caso de las escombreras, en Chile se producen "a diario" unas 650.000 toneladas de colas que van a parar a las diversas balsas del país (J. Wiertz, *com. pers.*).



Ejemplo de una balsa construida aguas arriba en un valle. Balsa de la Highland Valley Copper Mine en la Columbia Británica (Canadá). Arriba, prueba para una localización óptima de la balsa; abajo, diseño y localización definitiva (Tailings.info, 2010a).

- Las pilas de lixiviación han de ser tratadas en sus dos tipos principales, las ácidas para recuperación de cobre (principalmente a partir de minerales oxidados) y las de cianuración para la recuperación de oro. Estas pilas no

representan *per se* mayores peligros ambientales, aunque las piscinas de solución que las rodean sí. Su diseño es simple, disponiéndose sobre una base normalmente rectangular e impermeabilizada. Dado que la solución metalífera se obtiene por regado mediante aspersores y percolación hacia la base, la pila no puede ser ni muy alta ni estar demasiado inclinada, lo cual la hace muy estable. Sin embargo, los reactivos utilizados en los procesos, ácido sulfúrico diluido en el caso del cobre, y cianuro de sodio en el caso del oro, confieren a estas operaciones un riesgo elevado, particularmente en el segundo caso.

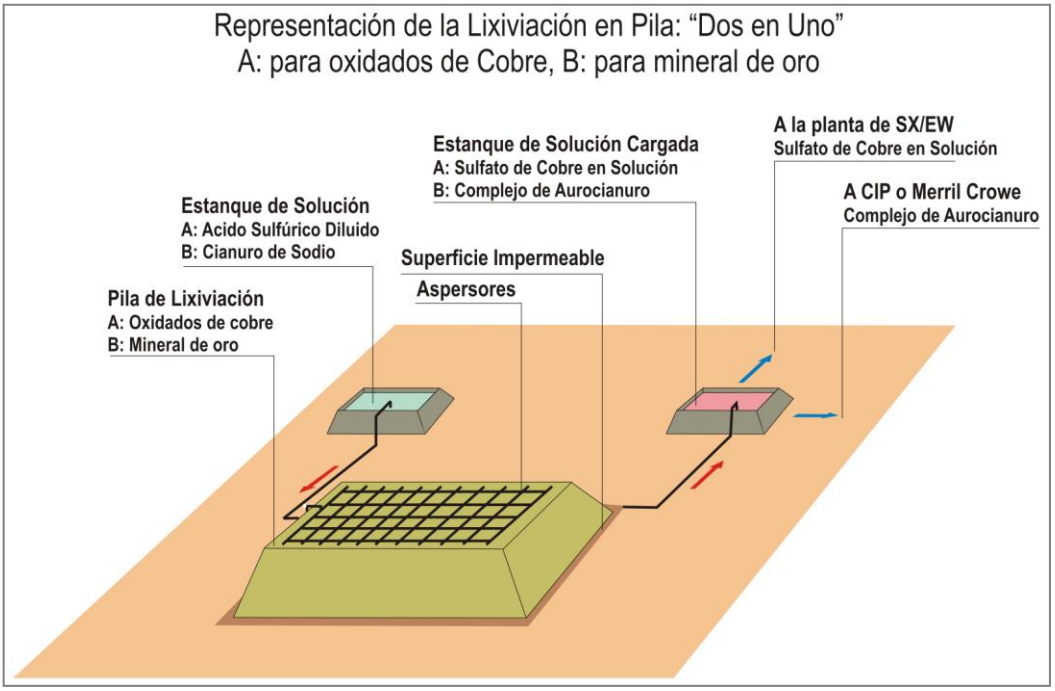


Diagrama esquemático que representa en una sola figura (dada su similitud operacional) el proceso de lixiviación en pila para minerales oxidados de cobre y de oro. Aunque ambos procesos son muy parecidos físicamente, la química difiere substancialmente. CIP: carbón in pulp; SX/EW: solvent extraction/electrowinning.



Izquierda, pila de lixiviación para minerales de cobre en la mina RT (Chile); a la derecha, pila para lixiviación aurífera en Pierina (Perú) (imagen[32]).

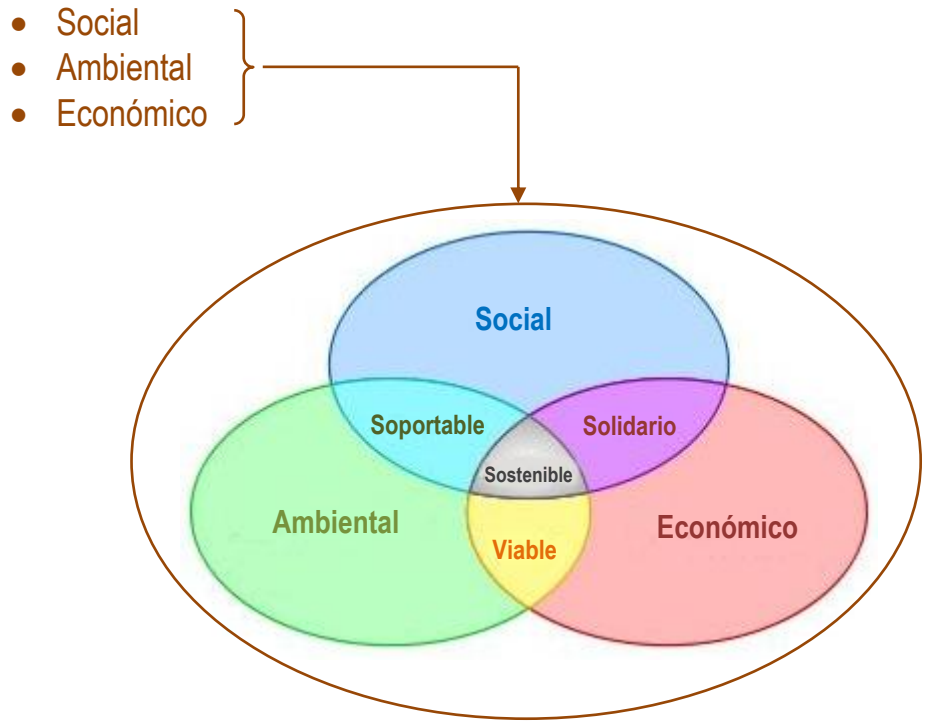
El tema socio-económico. Hasta hace relativamente pocos años el tema del desarrollo sostenible era más bien un concepto manejado por pocos y básicamente a nivel teórico, sin repercusiones reales sobre la actividad industrial. Una empresa (da igual que fabricara coches o extrajera minerales) se instalaba en una zona, cerca de una ciudad, y si las cosas no iban demasiado bien, cerraba y poco más. Los trabajadores podían cobrar un subsidio de desempleo por un determinado espacio de tiempo y con eso parecía todo resuelto. Eso cuando los trabajadores estaban insertos en un régimen laboral que permitía tales coberturas sociales, cosa que en la mayoría de los países pobres no existía o era ridículamente insignificante. Pero de lo que no se hablaba en términos de cobertura era de todos los puestos de trabajo "indirectos" que se perdían con el cese de la actividad industrial. Este capítulo abarca desde las muchas empresas contratadas por la empresa principal (subcontratas) para la fabricación de piezas mecánicas, prestación de servicios profesionales, servicios menores, etc. A esto debemos sumar todo el dinero que desaparecía de un pueblo. Por ejemplo un trabajador de la empresa adquiría bienes de consumo en el pueblo, desde comida hasta artículos electrónicos. En fin, el daño era múltiple y en muchos casos irreversible, tanto así que en el caso de la minería, *muerta la mina, muerto el pueblo*.



Pampa Unión, vestigios de la actividad minera de los nitratos en el Norte de Chile (imagen[33]).

La idea de desarrollo sostenible va mucho allá de la de la mera protección ambiental. Por supuesto que el tema ambiental está presente en cualquier plan de desarrollo sostenible, pero el desarrollo sostenible se centra en las personas, en el futuro de estas y en la equidad intergeneracional (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Es decir, se trata de que las generaciones venideras "tengan" un futuro real, a ser posible, aun mejor que el existente en el momento de la actividad. No se trata de que las empresas mineras se transformen en ONGs, son empresas que necesitan

tener ganancias de un negocio que consiste en extraer minerales y metales. Pero lo que sí es exigible a las empresas, es que tengan un trato ético con los habitantes de una región. Así, si hablamos de sostenibilidad, nos referimos a tres aspectos básicos:



Los tres pilares de la sostenibilidad, ambiental, económico, social, y sus interacciones. Cualquiera sea el modelo de elección el objetivo último de cualquier actividad económica debe basarse hoy en día en la sostenibilidad.Tomada de Oyarzún y Oyarzun (2011).

Es donde confluyen estos tres elementos que podemos encontrar claves para la sostenibilidad. Pero claro, este no ha sido el caso la mayoría de las veces, aunque las empresas mineras y del sector de energéticos han realizado notables avances en la última década. Por otra parte, quienes más perjudicados han salido del tema minería (o energéticos) – sociedad en términos históricos han sido los pueblos indígenas.

> *Last year, the Indonesian government's National Human Rights Commission investigated allegations of abuses at the Kelian mine and found egregious violations. The Commission's report reveals that the Indonesian military and company security forcibly evicted traditional miners, burned down villages, and arrested and detained protestors since the mine opened in 1992. Local people have systematically lost homes, lands, gardens, fruit trees, forest resources, family graves and the right to mine for gold in the river, according to the Human Rights Commission*
>
> *Kennedy (2001)*

Los pueblos autóctonos de África, Asia o Iberoamérica raramente han podido participar en la toma de decisiones sobre concesiones mineras o petroleras. Bien porque han recibido el epíteto de salvajes peligrosos y/o porque carecían de títulos de propiedad de las tierras que habitaban. Así, en ocasiones las empresas han entrado en sus territorios generando una serie de trastornos que en el caso más agudo ha supuesto la pérdida de las tierras y la

movilización forzosa hacia otros lugares. ¿Pero existen casos así aun hoy en día? Por supuesto que sí, y uno notable tuvo que ver con la mina de oro de Kelian (Indonesia) de RTZ, donde en los años 1990's se cometieron una serie de abusos contra los derechos humanos, incluyendo la expulsión territorial de los habitantes de la zona (MMSD, 2002).

4.4 Mitigación de impactos mediante medidas correctoras

4.4.1 Introducción: hope for the best, prepare for the worst

La mejor manera de evitar los accidentes en minería es simplemente no creando las ocasiones para que estos ocurran. Como ya hemos expresado con anterioridad, existen situaciones en minería que hacen que la probabilidad de que ocurra un "incidente ambiental" suba muchos puntos, y que además dicho incidente tenga gravísimas consecuencias ambientales y sociales. Si algo hay que tener claro en minería, como en cualquier otra actividad industrial es que los accidentes ocurrirán.

Da igual las medidas preventivas que se puedan adoptar (que no obstante deberán ser adoptadas). La razón es simple, al final quienes operan una mina son personas, que pueden tener "un mal día", por estar cansados, irritados, distraídos, etc. De esta manera no debemos preguntarnos "si" un accidente ocurrirá, sino más bien "cuándo" y "dónde" ocurrirá. Más importante aún, debemos saber qué haremos cuando eso suceda.



Dos accidentes en minería. El primero (izquierda) a pesar de lo espectacular tiene nulas connotaciones ambientales; el segundo (derecha) muestra la rotura del dique de contención de la balsa de Aznalcóllar (España). El 25 de Abril de 1998 se produjo la rotura del dique y el Río Guadiamar recibió el vertido de 6 hm^3 de lodos y aguas ácidas (Olías et al., 2005) (imágenes[34,35]).

Al respecto, deberíamos primero distinguir bien lo que podríamos llamar "local", esto es, un incidente que afecta básicamente las instalaciones o maquinaria minera, de lo que debemos llamar "externo", con impactos más allá del ámbito minero estricto. Hay que definir en este último el área afectada y la razón de la afectación. Segundo, deberíamos tener claro "qué" estamos afectando. Como ya hemos comentado anteriormente, no será lo mismo inundar con residuos mineros líquidos una porción de desierto que una selva tropical. Hablamos del mismo incidente pero con repercusiones muy diferentes. Si a esto sumamos que un río afectado puede además ser fuente de sustento (pesca y agua) para los habitantes de una región, entonces el daño puede multiplicarse por mucho.

Aquí deberíamos regresar al primer párrafo de esta sección, que dice que la mejor manera de evitar los accidentes en minería es simplemente no creando las ocasiones para que estos ocurran. También deberíamos reflexionar sobre lo siguiente, si bien los yacimientos minerales poseen un valor localizado, es decir, solo pueden ser explotados donde están, tampoco es menos cierto que hay zonas en el mundo donde la minería quizás no debería llevarse a cabo, o realizarse bajo unos controles mucho más importantes que los actualmente vigentes.

The Ok Tedi Negotiations: Rebalancing the Equation in a Chronic Sustainability Dilemma

Between November 2005 and June 2007, a team from The Keystone Center helped organize and implement a multiparty negotiation process aimed at increased redress for people affected by river contamination from the Ok Tedi Mine in Papua New Guinea (PNG). Ok Tedi is often cited as one of the worst man-made environmental disasters in the world. It is also a true sustainability dilemma. The mine produces 20% of PNG's gross domestic product but it has also disrupted the traditional food webs and lives of more than 50,000 people by putting 90,000 tons of rock waste and tailings per day into the Fly River system.

Adler (2011)



La mina Ok Tedi (Papúa Nueva Guinea)

Uno de estos lugares es la Isla de Papúa Nueva Guinea, controlada en su parte occidental por Indonesia donde recibe el nombre de Irian Jaya, y al Este donde se localiza la república de Papúa Nueva Guinea. Ahí se han desarrollado dramas ambientales de incalculables repercusiones para el medioambiente (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Pero ¿qué se puede esperar que ocurra cuando la minería se lleva a la cima de una montaña donde no existe espacio físico como para albergar los residuos mineros? Esta es tan solo una pregunta retórica en el caso de Ok Tedi por tres razones principales:

1. Cuando comenzó la explotación del yacimiento (oro en 1984, cobre en 1987) la preocupación ambiental no era lo suficientemente grande en el mundo como para que las compañías mineras adoptaran medidas especiales.
2. Porque el propio gobierno de Papúa Nueva Guinea es accionista de la empresa.
3. Porque la empresa representa casi el 30% de los ingresos de Papúa Nueva Guinea por exportaciones.

En fin, que así han sido muchas veces las cosas en el mundo de la minería, y por último, quien es uno para decirle a una nación pobre que no explote sus recursos minerales por razones ambientales. Una vez dicho esto, agreguemos que los grandes yacimientos de oro-cobre de la Isla de Nueva Guinea (Grasberg, Ok Tedi, Porguera) quizás nunca deberían haber empezado a producir porque, se hiciera lo

que se hiciera, iban a contaminar y mucho en una región de especial importancia biológica.

¿Qué se puede hacer en estos casos? Poco y nada, el daño ya está hecho, y hablar de remediación en ecosistemas tan complejos como los de Nueva Guinea suena ingenuo por decir lo menos. Pero en fin, nos centraremos en esta sección en aquellos problemas que sí tienen solución (y a veces muy fácil). Para esto mantendremos un orden similar al de la sección anterior, empezando eso sí con el tema de la gestión de aguas, ya que el tema de la mina y sus instalaciones no es un tema susceptible de ser corregido, no al menos en sus aspectos más importantes.

4.4.2 Corrigiendo impactos ambientales

La gestión de las aguas. Este es un tema difícil por la diversidad y complejidad de los problemas que pueden plantearse:

El primer aspecto a considerar se relaciona con la "modificación" de la morfología-topografía del terreno que genera desequilibrios que aceleran los procesos de erosión hídrica. Esto puede dar lugar a fenómenos de remoción en masa y transporte a los ríos, lo que aumentará la turbidez de estos e incrementará la carga metálica de los sedimentos. Dado que la minería subterránea no generará estos problemas, nos podemos centrar en aquella a cielo abierto del tipo "cantera", es decir, explotando una montaña lateralmente:



Minería del caolín en una ladera de montaña en el Alto Tajo (Guadalajara, España). Una explotación a cielo abierto de esta naturaleza incrementa el peligro de erosión y de fenómenos de remoción en masa.

Medidas correctoras: Estos fenómenos pueden ser corregidos mediante la utilización de diques de contención que capturan los sedimentos durante las lluvias (abajo izquierda). Además se pueden realizar obras de estabilización de escombreras buscando el perfil más adecuado de estas y la vegetación que mejor puede contribuir a la estabilización de los materiales sueltos.



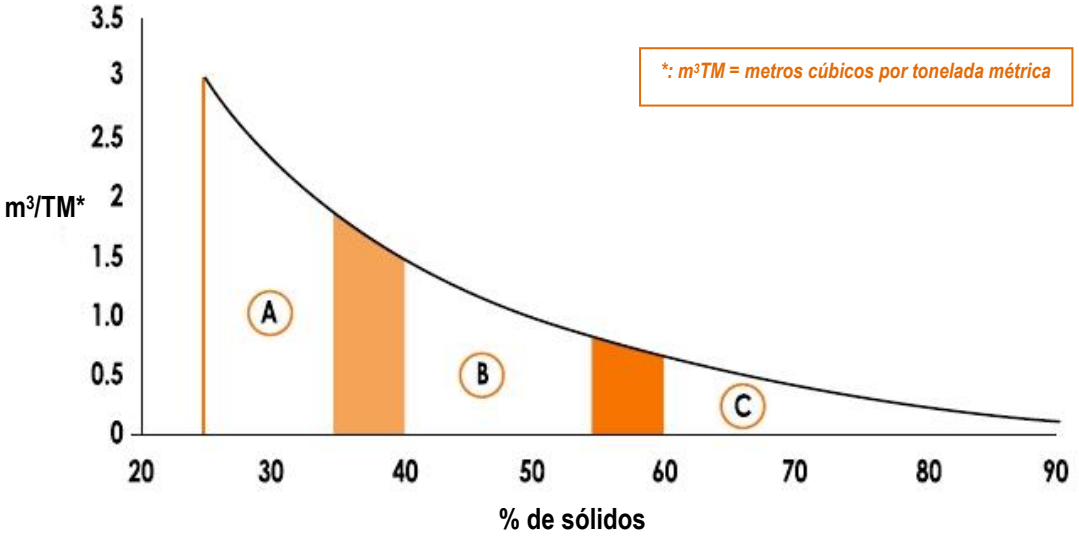
A la izquierda, dique de contención para atrapar los sedimentos de una explotación a cielo abierto que han sido removidos por lluvias; a la derecha, trabajo experimental en escombreras buscando perfiles y vegetación ideales para su estabilización.

Otras medidas correctoras pueden pasar por la utilización de geotextiles para la protección de superficies de fuerte pendiente susceptibles de ser erosionadas por las lluvias:



Muro y pendiente cubiertos con GCL (geosynthetic clay liners) y geotextil (imagen[36]).

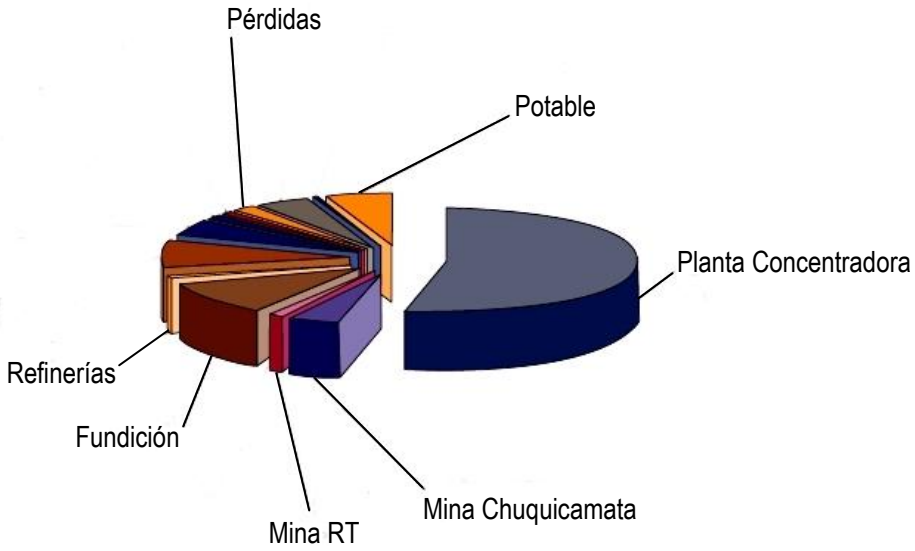
El segundo aspecto importante pasa por el tema del uso del agua, un tema particularmente decisivo en regiones áridas o semiáridas, ya que se entra en directa competencia con otras necesidades, como es el agua para usos urbanos y rurales. El consumo de agua difiere mucho de una actividad a otra. Por ejemplo, en el caso de la minería del cobre en Chile se necesita agua para (Cochilco, 2008): 1. Consumo en los campamentos de trabajadores, es decir, agua principalmente para beber, cocción, lavado, riego y baños; se trata de volúmenes poco significativos respecto al total consumido. 2. Consumo en la mina, que en la minería a cielo abierto sirve para el riego de los caminos con objeto de reducir el polvo en suspensión; el agua utilizada en riego de caminos puede variar entre cero y el 15% del consumo total de agua de una faena minera. 3. Consumo en las plantas concentradoras por flotación, que en la cadena productiva del cobre representa "el mayor consumo de agua" con respecto a los volúmenes totales.



Consumo de agua en los procesos de flotación-concentración. La zona A corresponde a rangos de operación típicos para el proceso de flotación. Una vez terminado este proceso se lleva la pulpa de concentrados a espesamiento (zona B), lo que significa aumentar el porcentaje de sólidos entre el 40% y 60%, con la consiguiente recuperación de agua. Finalmente, la pulpa de concentrados se lleva a filtración (zona C), donde nuevamente se recupera agua, quedando los concentrados con porcentajes de humedad del orden del 10%. Adaptada de Cochilco (2008).

4. Consumo para el transporte de concentrados; al respecto existen dos formas de transportar el concentrado desde las plantas a las fundiciones o a un puerto, esto es, mediante camiones o trenes, o a través de un "mineroducto"; en este último caso para que el concentrado fluya a lo largo del conducto es preciso agregar agua; en promedio el agua utilizada representa entre un 4 y un 6% del total del agua consumida en las respectivas plantas concentradoras. 5. Consumo en las fundiciones, que tiene dos aplicaciones, la producción de oxígeno en el proceso de conversión y la generación de ácido sulfúrico a partir de SO_2. 6. Consumo en las refinerías electrolíticas, que representa el último proceso de la vía pirometalúrgica de recuperación del cobre, donde los ánodos provenientes de la fundición son

disueltos electroquímicamente; esto se hace para eliminar las impurezas y depositar selectivamente el cobre puro (99,99% Cu) en los cátodos. 7. Consumo en los procesos de lixiviación y SX/EW, que consumen agua para el riego de las pilas con ácido sulfúrico diluido y luego en la planta de extracción por solventes y electro-recuperación (SX/EW).



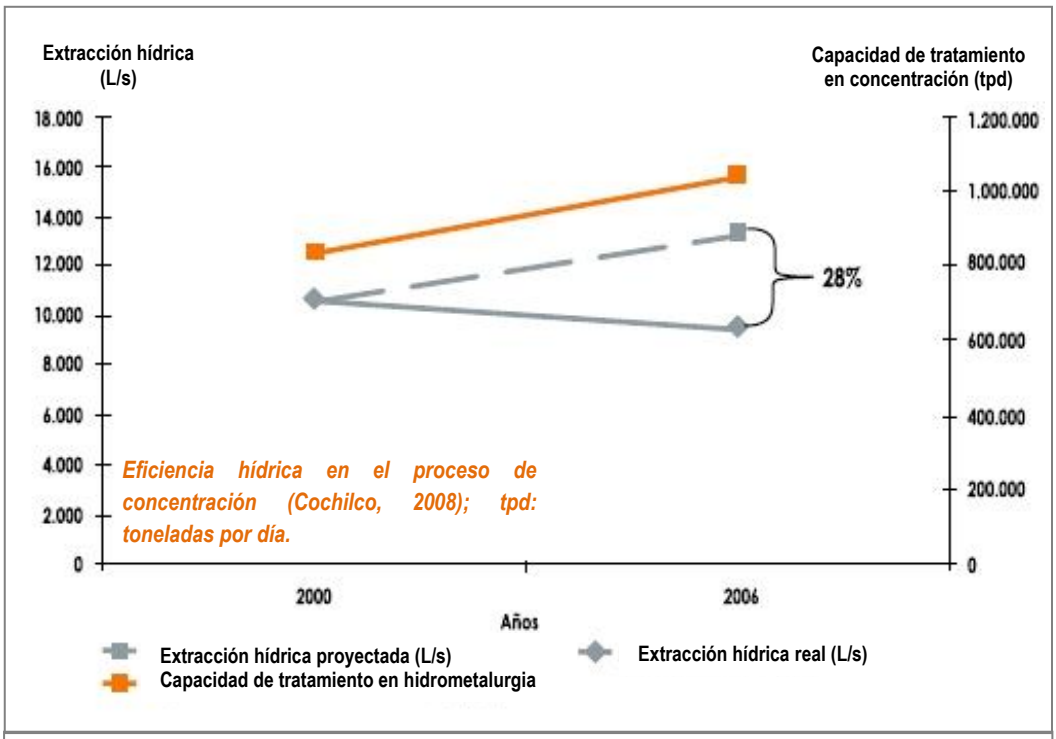
Algunas tasas relativas de consumo de agua tratadas en los puntos anteriores y en lo que se refiere a CODELCO Norte (Chile). Adaptada y simplificada de Cochilco (2008).

Medidas correctoras: Como se puede apreciar de lo anteriormente dicho, los mayores consumidores de agua en una mina son dos procesos: la flotación-concentración y las operaciones de hidrometalurgia. En ambos se puede ganar en eficiencia hídrica y esto ha sido así en gran medida en el caso chileno. La siguiente tabla muestra los consumos medios de agua por tonelada métrica de mineral en la flotación-concentración e hidrometalurgia:

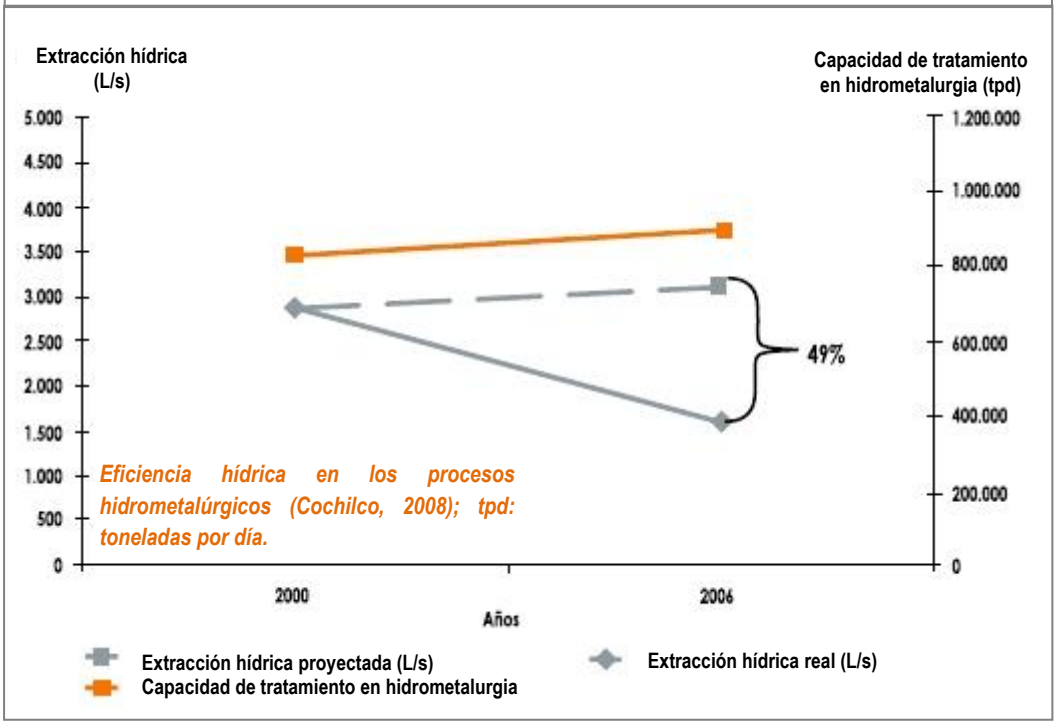
Proceso	Consumo unitario de agua fresca 2000 m^3/TM	2006 m^3/TM
Flotación	1,1	→ 0,79
Hidrometalurgia	0,3	→ 0,13

Avances en Chile en la eficiencia del consumo de agua en los procesos de flotación e hidrometalurgia en el periodo 2000-2006 (Cochilco, 2008). TM: toneladas métricas.

Por su parte la eficiencia hídrica ganada en el mismo periodo se muestra en los siguientes dos gráficos:



Eficiencia hídrica en el proceso de concentración (Cochilco, 2008); tpd: toneladas por día.



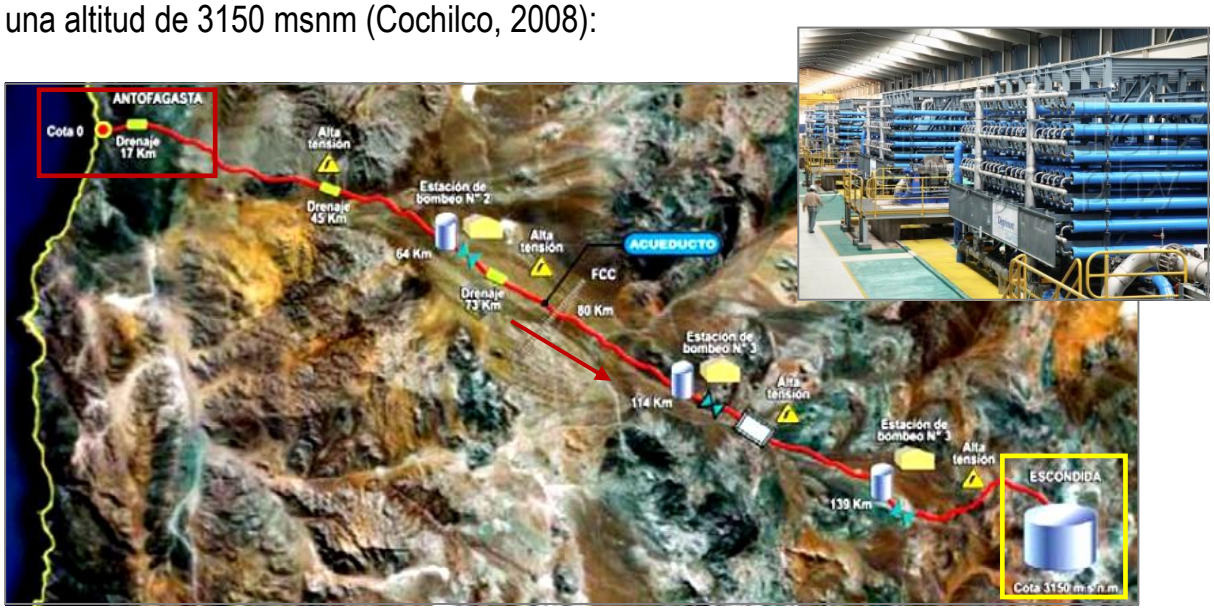
Eficiencia hídrica en los procesos hidrometalúrgicos (Cochilco, 2008); tpd: toneladas por día.

De cualquier manera, para ganar en eficiencia hace falta saber primero cuanto se consume, por esto las medidas correctoras (Cochilco, 2008) han de empezar con el manejo y control adecuado de los derechos de agua mediante la realización de un catastro actualizado. Se debe disponer además del instrumental adecuado que permita medir "en línea" (*on-line*) los volúmenes de agua en las entradas y salidas de los procesos unitarios a fin de determinar el balance hídrico de los mismos. Por

otra parte habrá que disponer de indicadores en aquellas actividades identificadas como claves que permitan controlar los caudales y la calidad establecida para el agua.

En estas materias se pueden conseguir grandes avances como, por ejemplo, en la empresa minera Candelaria (Copiapó, Chile). El agua fresca en esta empresa se obtiene de fuentes subterráneas. La mina reutiliza el recurso hídrico con un sistema que permite obtener un reciclaje de agua de alrededor del 87% del consumo total. Un 57% corresponde al agua recirculada de los espesadores de concentrados de cobre y del espesador de relaves. Un 30 % es recuperado de las balsas (*tranques de relaves*), por lo que el agua fresca que ingresa al sistema representa el 13% del consumo total de agua. De esta manera, de los 750 L/s que Candelaria tiene por concepto de derechos de agua solo usan sólo alrededor de 280 (Cochilco, 2008).

En un plano más radical, una empresa minera puede cortar su dependencia de fuentes hídricas superficiales o subterráneas mediante la construcción de una desaladora. Claro está, esto solo será posible si la mina se encuentra lo suficientemente cerca del mar. El caso más notable en este sentido es el de Escondida (Antofagasta, Chile). La inversión en la planta desalinizadora fue de unos US$ 200 millones, que se descomponen en 50 millones de dólares para la planta propiamente tal y 150 millones de dólares para el sistema de bombeo. El agua de mar es captada por bombas sumergibles, pasando a través de tuberías hacia un sistema de sedimentación, para posteriormente ingresar a la etapa de prefiltrado y filtrado, y finalizar con el ingreso a la Planta de Osmosis Inversa. El agua pasa entonces por cuatro estaciones de bombeo a lo largo de 170 km y hasta una altitud de 3150 msnm (Cochilco, 2008):



Planta desaladora (recuadro superior) (imagen[37]) de Antofagasta (recuadro rojo) y conducción del agua hasta la mina Escondida (recuadro amarillo). Adaptada y modificada de Cochilco (2008).

El tercer aspecto está relacionado con la prevención de la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por efluentes mineros derivados de combustibles o substancias químicas utilizadas en los procesos metalúrgicos:

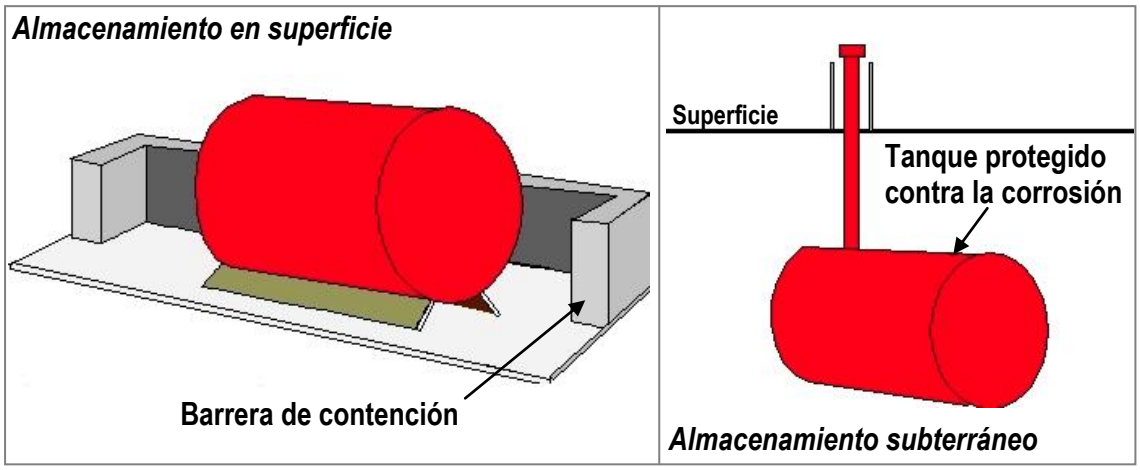
- Combustibles y otras substancias líquidas peligrosas mal almacenadas.
- Ácidos diluidos y soluciones cianuradas utilizados en las operaciones de lixiviación en pila.

En el "primer apartado" debemos considerar todas las substancias químicas en estado líquido utilizadas en las operaciones mineras. De acuerdo a ELAW (2010) citando a la Australia Water and Rivers Commission (2000), los problemas pueden surgir de: 1. La falta de instalaciones de contención. 2. Una mala construcción o deterioro de las instalaciones de contención. 3. Operaciones inadecuadas de mantenimiento de equipos. 4. Prácticas deficientes en el mantenimiento de las instalaciones. 5. Daño por accidente. 6. Vandalismo deliberado.



Un ejemplo de cómo "no" debe almacenarse el combustible o cualquier otra substancia peligrosa líquida (imagen[38]).

Medidas correctoras: Las medidas empiezan por disponer de tanques, en superficie o enterrados (dependiendo de lo que la legislación indique) que cumplan con dos requisitos principales, estar protegidos contra la corrosión y tener barreras de contención:



Medidas simples para evitar accidentes de derrame en tanques de almacenamiento de combustible (imágenes[39]).

Pero no basta con construir y disponer los tanques adecuadamente, una política de revisión y mantenimiento continua es clave para evitar problemas. Por otra parte, el lugar deberá estar adecuadamente señalizado y protegido.



Infografía relativa a la toma de precauciones debido a la presencia de una instalación de almacenamiento de combustibles (imágenes[40,41]).

El "segundo apartado" guarda relación con los potenciales problemas que se podrían derivar de un derrame de cianuro o de soluciones ácidas a un río o lago, sin olvidar las consecuencias para las aguas subterráneas. Un derrame de soluciones ácidas es ya malo *per se* para la vida acuática, pero el cianuro son palabras mayores. De acuerdo a CDC (2006), las personas expuestas a pequeñas cantidades de cianuro por respiración, absorción de la piel o consumo de alimentos contaminados con cianuro pueden presentar algunos o todos los síntomas siguientes en cuestión de minutos: respiración rápida, agitación, mareo, debilidad,

dolor de cabeza, náusea y vómito, ritmo cardíaco rápido. En el caso de dosis mayores puede causar convulsiones, tensión (presión) sanguínea baja, ritmo cardíaco lento, pérdida de la conciencia, lesión en los pulmones, fallo respiratorio que conduce a la muerte. Poco más que agregar, salvo que lo mismo que ocurre en humanos le ocurre (y a menores dosis) a la vida acuática.

Medidas correctoras: Quizás más que de medidas "correctoras" deberíamos aquí hablar de medidas "preventivas", ya que una vez que ha ocurrido un vertido de cianuro o ácido poco se puede hacer salvo contemplar como el desastre ambiental avanza por un río. En otras palabras, el margen para accidentes en estos casos es "cero".

He aquí lo que InfoMine recomienda respecto al cianuro (Mudder, 2011): 1. Producción: fomentar la manufacturación responsable del cianuro, mediante la compra a fabricantes que operan de una manera segura y ecológicamente responsable. 2. Transporte: proteger a las comunidades y el medio ambiente durante el transporte del cianuro. 3. Manipulación y Almacenamiento: proteger a los trabajadores y el medio ambiente durante la manipulación y almacenamiento de cianuro. 4. Operaciones: manejar adecuadamente las soluciones del proceso de cianuración y los flujos de residuos para proteger la salud humana y el medio ambiente. 5. Desmantelamiento: proteger a las comunidades y el medio ambiente a través del desarrollo e implementación de planes de desmantelamiento de las instalaciones de cianuro. 6. Proteger la salud y seguridad de los trabajadores ante la exposición al cianuro. 7. Respuesta de Emergencia: proteger a las comunidades y el medio ambiente a través del desarrollo de estrategias de respuesta de emergencia. 8. Capacitación: capacitar a los trabajadores y al personal de emergencia para manejar el cianuro de una manera segura y ecológicamente responsable.

Barrick's Responsible Use of Cyanide

The principles and objectives of the International Cyanide Management Code reflect Barrick's commitment to safe cyanide management. We adopt a comprehensive and responsible cyanide management approach that includes:

** Comprehensive training of employees, as well as ongoing refresher training*
** Requirements that cyanide manufacturers and transporters be Code compliant*
** Ongoing monitoring and reporting to government regulators*
** Independent auditing*
** Accident prevention planning*
** Effective emergency response systems*
** Communicating with communities and other stakeholders*
** Planned decomissioning of cyanide facilities at mine closure*

Due to rigorous safety procedures, there has not been a single fatality associated with cyanide at Barrick's operations. In fact, cyanide intoxication incidents are extremely rare.

Barrick (2011)



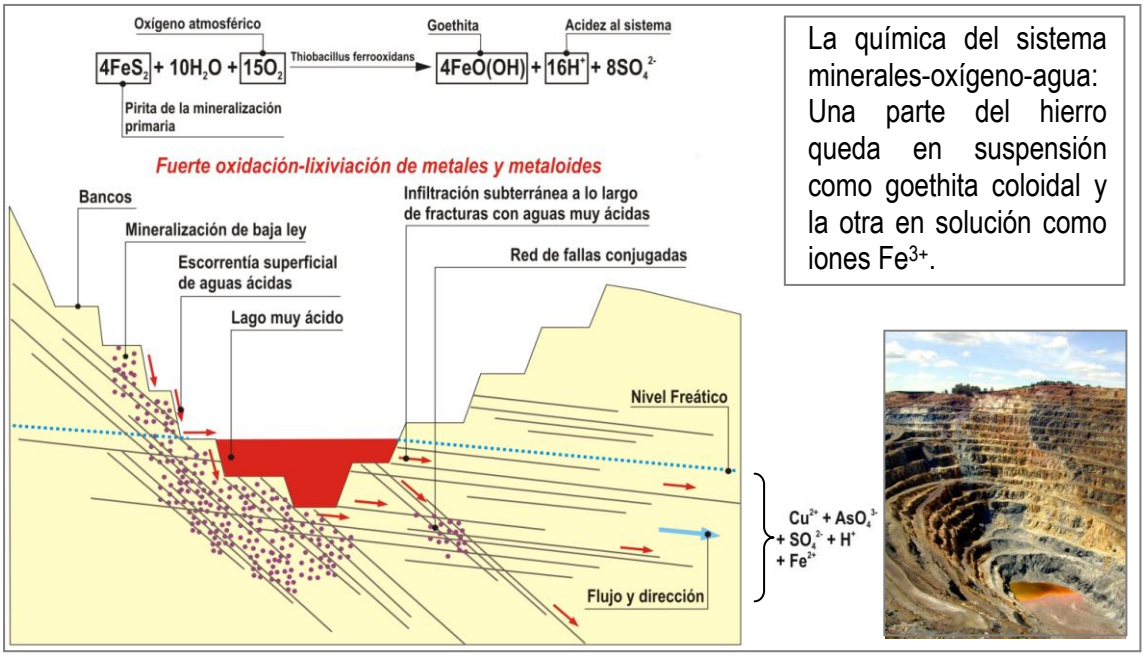

A la izquierda, transporte seguro de cianuro por carretera; derecha, columnas de carbón activo (CIP) para la extracción de oro a partir de las soluciones cianuradas (imágenes[42,43]).

Con respecto al ácido sulfúrico, las mismas propiedades químicas que lo hacen de utilidad para la industria también lo convierten en un peligro para el medioambiente y un peligro potencial para quienes lo manipulan y transportan. Sus propiedades corrosivas y reactivas lo convierten en extremadamente peligroso cuando entra en contacto con sustancias orgánicas tales como los azúcares, las grasas y las proteínas que forman el tejido humano (NorFalco, 2011). En contacto con la piel o los ojos provoca quemaduras graves. Su ingestión puede causar severos daños para la salud de las personas; a lo que debemos agregar que la inhalación de vapores concentrados o emanaciones desde un ácido caliente puede dañar los pulmones (Minera Pampa de Cobre, 2005).

Al igual que en el caso del cianuro, más vale aquí prevenir que curar. La Guía de Manejo Ambiental de Reactivos y Productos Químicos del Ministerio de Minas y Energía del Perú (2011) indica que se deberá neutralizar a la brevedad posible los derrames de ácido sulfúrico en el suelo. Una fracción significativa del ácido derramado será neutralizada por los constituyentes del propio suelo. Sin embargo y como medida precautoria, se deberá añadir una "base" para completar la neutralización. La misma guía indica que el ácido sulfúrico es normalmente transportado en camiones cisterna y almacenado en instalaciones de superficie para su almacenamiento a granel. La concentración de ácido entregado se encuentra entre el 93 y 95% de H_2SO_4. Mientras las concentraciones excedan el 90% se puede utilizar acero corriente para los materiales de construcción. Todas las instalaciones para productos a granel deberán contar con dispositivos de contención secundaria y estar construidos de materiales que no reaccionen con el ácido. Además se deberán desarrollar procedimientos especiales para la descarga del ácido, para reducir al mínimo los posibles derrames y el riesgo de daños a los trabajadores.

El cuarto aspecto se relaciona con el "drenaje ácido de mina", un problema que puede ser muy grave en algunos casos. Este se puede originar en las labores mineras (subterráneas o a cielo abierto) o en las escombreras, balsas y pilas de lixiviación.

La actividad minera pone las rocas en contacto directo con las aguas y el oxígeno. Si bien de forma natural hay formación de drenaje ácido en cualquier yacimiento de sulfuros metálicos, las operaciones mineras multiplican y aceleran el problema. Como ya hemos tratado previamente los aspectos químicos y geológicos del drenaje ácido, aquí iremos a lo esencial. Limitémonos a comentar que las minas se transforman en "reactores químicos" donde la oxidación de la pirita da origen a ingentes cantidades de ácido sulfúrico, y que si la mina ha sido abandonada sin más, el problema solo empeorará.

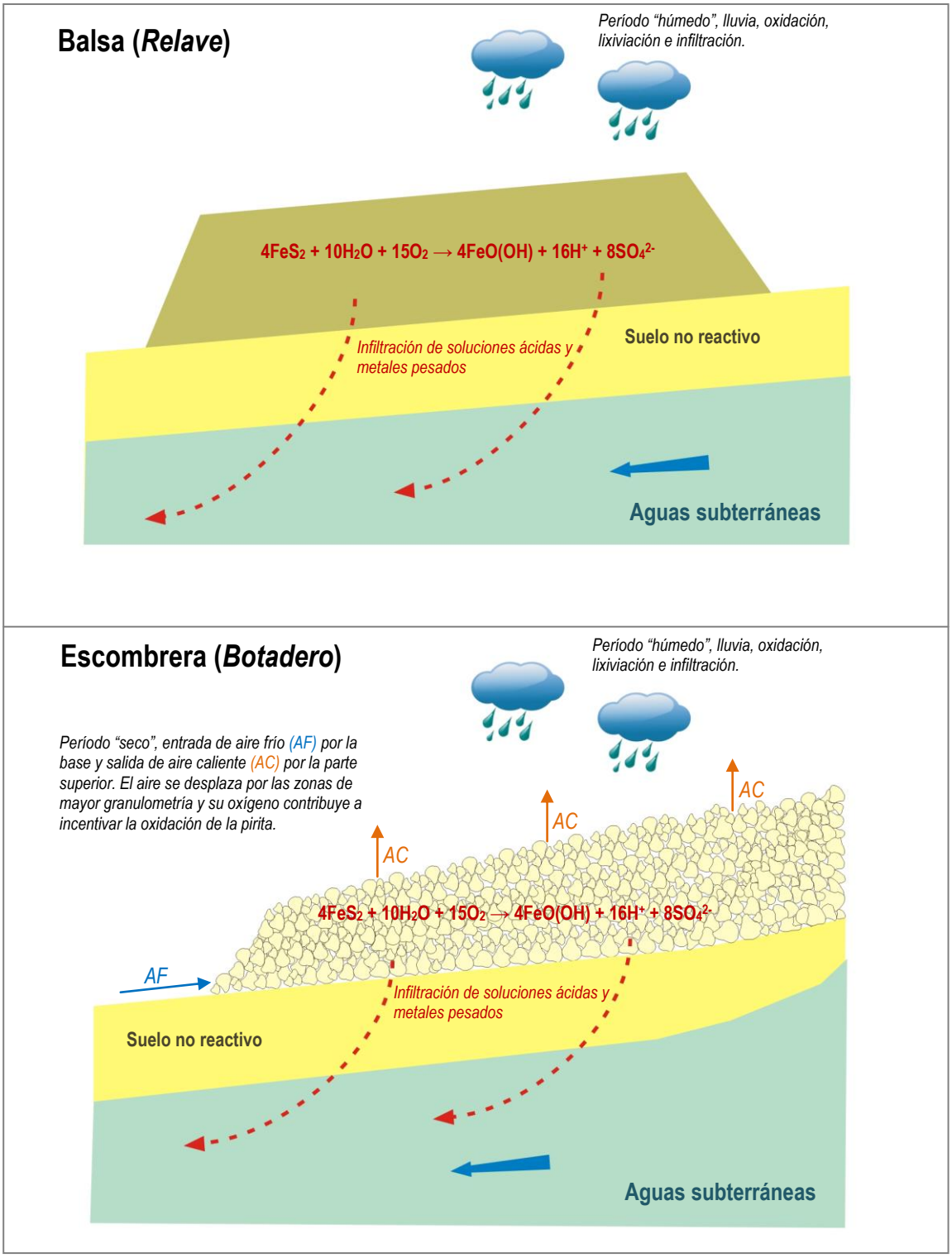


Procesos hidroquímicos asociados a la formación de un "lago ácido de corta" (imagen). Modificada de Oyarzún y Oyarzun (2011).

La formación de un lago ácido de corta (*rajo*) puede parecer anecdótica y carente de peligro asociado, después de todo, se trata de "un lago que no va a ninguna parte". Craso error, como podemos apreciar en la figura superior se trata de un sistema "abierto" donde las aguas de mina interaccionan con las subterráneas, llevando la contaminación más allá del perímetro de la explotación. Lo único que puede aliviar una situación de esta naturaleza es que la roca encajante sea carbonatada, por ejemplo, calizas, ya que estas reaccionarán con el ácido neutralizándolo (de manera simplificada):

$$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2$$

Lo mismo se aplica a los residuos mineros dejados por el descarte de mineral sub-económico de una mina que es depositado en escombreras, y también a las colas de una planta de flotación. En uno y otro caso tendremos pirita, y por lo tanto el potencial para generar drenaje ácido.



Infiltración de drenaje ácido y metales en los suelos y de ahí a las aguas subterráneas. El proceso se verá favorecido por la inexistencia de un suelo reactivo con el ácido sulfúrico. Movimiento del aire y contribución a la oxidación basado en Wels et al. (2003).

Medidas correctoras: Lo primero que habría que hacer es analizar el potencial de una mina para generar drenaje ácido. Como este dependerá de lo mineralogía de la mena y del encajante, hay que determinar antes de que empiece la explotación

la proporción entre la pirita y los otros sulfuros. Si esta es elevada (p.ej., > 3:1) y la roca encajante tiene una capacidad de reacción baja (p.ej., una roca ígnea cuyos feldespatos han sido transformados en arcillas tipo caolín), entonces la empresa debería empezar a buscar soluciones ambientales desde antes de que empiece la explotación. Esto tiene que quedar muy claro en el estudio de impacto ambiental. Por otra parte, si la pirita no es muy abundante y/o la roca es reactiva (p.ej., una caliza), entonces la probabilidad de que se forme un importante drenaje ácido será baja. Este es un tema importante a resolver, ya que las escombreras y balsas reflejarán en gran medida los potenciales problemas ambientales del yacimiento. Otro aspecto importante se relaciona con la mayor o menos abundancia de agua en el sistema y el oxígeno disuelto en esta. En este sentido, quizás un yacimiento problemático en su mineralogía jamás debiera ser explotado si se encuentra localizado en una región con cursos fluviales, importante vida acuática y/o con centros urbanos en las cercanías.

Existen pruebas técnicas para determinar el potencial para la generación de drenaje ácido. Los objetivos de estas pruebas de predicción son los siguientes (US EPA, 1994):

- Determinar si un volumen discreto de residuos mineros va a generar ácido.
- Predecir la naturaleza del drenaje en base a la tasa de formación de ácido.

De cualquier manera lo importante aquí es determinar "qué" se puede hacer en el caso de que por "x" razones se haya decidido y permitido seguir adelante con un proyecto minero conflictivo en cuanto a la potencialidad de generar abundante drenaje ácido.

Casi todos los procedimientos para evitar el problema del drenaje ácido se han centrado en la problemática de las minas abandonadas, y existen relativamente pocos estudios para minas activas. Entre esto destacan los resultados de un proyecto insertado en un programa mayor: *Mine Waste Technology Program Activity III, Project 26, Prevention of Acid Mine Drainage Generation from Open-Pit Highwalls* (McCloskey et al., 2005).

La intención de este proyecto era obtener datos de rendimiento en la capacidad de cuatro tecnologías para evitar la generación de drenaje ácido de mina a partir de un talud a cielo abierto. Las cuatro tecnologías aplicadas incluyeron:

1. Ecobond™ ARD, desarrollado por Metals Treatment Technologies, LLC de Denver, Colorado.
2. Una tecnología de pasivación utilizando óxido de magnesio, desarrollada por la Universidad de Nevada-Reno (UNR).

3. Una tecnología de permanganato de potasio desarrollada y patentada por DuPont y aplicada por la UNR.
4. Un sellador de resina de alcohol furfurílico desarrollado por Intermountain Polymers, de Idaho Falls, Idaho.

Las pruebas se llevaron a cabo en la mina Golden Sunlight (Montana), una explotación minera de oro a cielo abierto. Las diferentes tecnologías fueron probadas en un talud de la mina de 15 x 15 m. El objetivo consistió en comparar los resultados obtenidos para el área de prueba con otra superficie equivalente no tratada. Previamente la superficie fue sometida al test de Celda de Humedad (HC) (US EPA, 1994) para determinar su potencial generador de drenaje ácido. Cada tecnología inhibió el drenaje ácido de manera diferente, en respuesta a la química del proceso, el contenido en sulfuros, la morfología del muro, las condiciones meteorológicas, y la cantidad de agua que drenaba por el talud. Para datos específicos sobre la efectividad de cada tratamiento en esta fase experimental recomendamos revisar el trabajo de McCloskey et al. (2005).

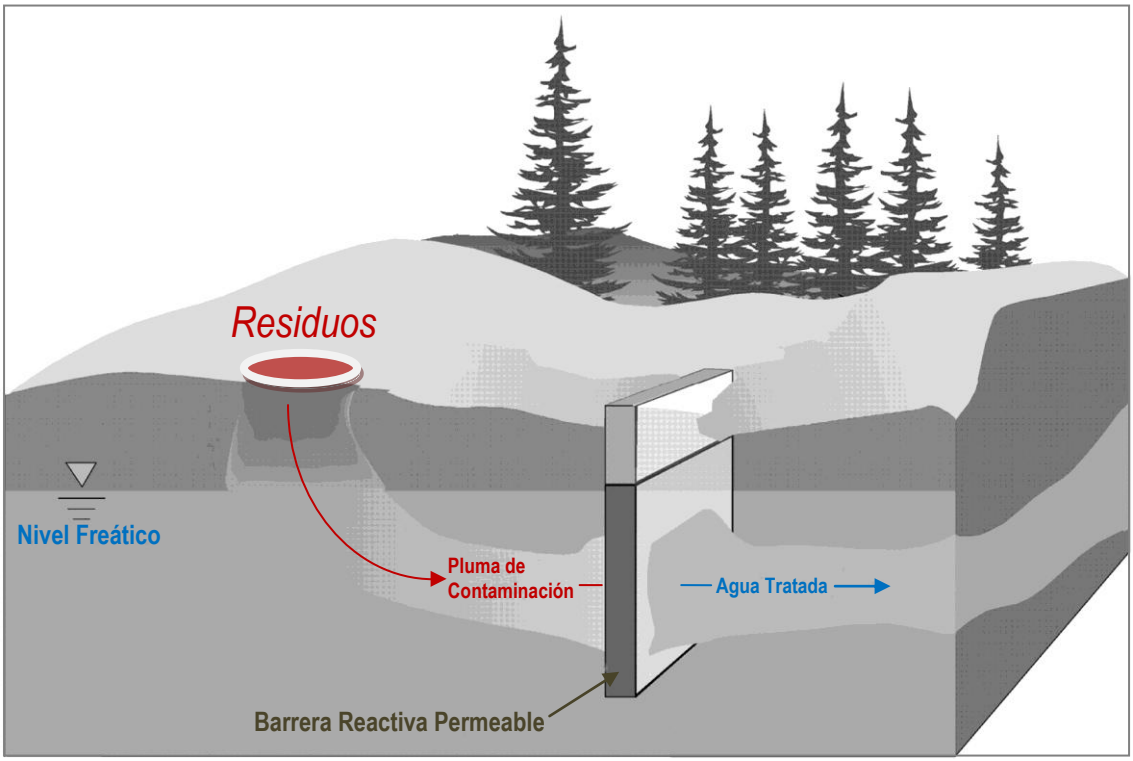
> *… By reducing the potential for AMD generation from a mine highwall, reclamation costs for mining companies and regulatory agencies could be minimized. However, the cost for implementing these technologies may be prohibitively expensive, and a tradeoff could be made relative to capturing and treating AMD …*
>
> *McCloskey et al. (2005)*

Cabe mencionar que estos procedimientos también pueden ser aplicados con cierto éxito a escombreras. Sobre estas últimas hay que destacar que también se pueden realizar medidas preventivas muy simples, como es sellar “sus bases expuestas” para evitar la entrada de aire. Este aire se mueve por las zonas de mayor granulometría de la escombrera de manera convectiva (entra aire frío, se calienta y sube) y contribuye a la oxidación de la pirita (Wels et al., 2003; Caldwell, 2006).

En lo que se refiere a las balsas, y también sería aplicable a las escombreras, lo ideal sería que quedaran dispuestas sobre materiales reactivos como carbonatos. No mencionamos aquí la impermeabilización de la base porque en el caso de las escombreras el peso sumado a la irregularidad morfológica de los materiales acabaría destrozando cualquier geotextil en un plazo breve. Aun si esto fuera factible solo estaríamos reteniendo el drenaje. Este drenaje retenido puede ser evaporado en estanques y los residuos tratados como tóxicos y peligrosos. Pero claro, así solo estamos modificando ligeramente el problema y moviéndolo de un sitio a otro, con lo cual volvemos al punto cero. Lo mismo se aplica a las balsas. En resumen, el problema del drenaje ácido tiene costosas soluciones de tratamiento activo y estas ni siquiera aseguran la eliminación del mismo. En el Anexo 1 revisaremos además de manera rápida el tema de los tratamientos pasivos en minas abandonadas.

A fin de cuentas, se trata de soluciones ácidas, por lo que el sentido común nos dicta que cualquier tratamiento, abordable o costoso pasará por la neutralización de las soluciones. En este sentido, el agente neutralizante natural más común es el carbonato, que encontraremos en formaciones de calizas.

Otra solución, pero más aplicable a las balsas (por su menor tamaño) que a las escombreras, pasa por la disposición de barreras, y dentro de estas las más prometedoras parecen ser las semipermeables. Al respecto, Striegel et al. (2001) explican que el concepto de barreras del subsuelo ha sido revisado para desarrollar una tecnología nueva de remediación de aguas subterráneas, llamada Barreras Reactivas Permeables (BRP). En vez de restringir el flujo de las aguas subterráneas, las BRP están diseñadas para permitir que las aguas subterráneas fluyan a través de estas. Cuando el agua contaminada pasa a través de la BRP, los contaminantes son inmovilizados o transformados químicamente a un estado menos tóxico.



La barrera reactiva permeable (BRP) es una tecnología relativamente nueva que puede ser un remedio rentable y de bajo mantenimiento de un sitio contaminado. Sin embargo, para utilizar adecuadamente una BRP, el restaurador debe entender la tecnología, las condiciones geológicas del lugar y la naturaleza de los contaminantes. Figura adaptada de Striegel et al. (2001).

Ruido y vibraciones. Poco podemos agregar a lo ya dicho sobre ruido y vibraciones en una operación minera, salvo volver a insistir que dadas las particulares características de una operación minera a cielo abierto, poco se podrá hacer para mitigar algunas fuentes de vibración y polvo. En el caso de las minas subterráneas el tema del ruido se verá minimizado, al menos en lo que a voladura

de rocas se refiere, aunque persistirán los problemas derivados de otras operaciones mineras que necesariamente han de ser realizadas en superficie.

En este apartado debemos diferenciar los problemas del entorno de trabajo, que afectan directamente a los mineros, de aquellos que puedan afectar a centros urbanos aledaños o la vida silvestre.

Medidas correctoras: Como en otros aspectos de la operación minera, todo empieza por el establecimiento de protocolos adecuados para la contención del ruido en la medida de lo posible. Al respecto ELAW (2010) señala lo siguiente como estrategias fundamentales:

- Las plantas de procesamiento de minerales deben ser ambientes cerrados y deberían contar con un cierto revestimiento acústico.
- Se deberían instalar barreras de sonido adecuadas y/o metodologías de contención del ruido, con ambientes cerrados y cortinas en o cerca de los equipos (p.ej., molinos).



Barreras acústicas para la reducción del ruido (imágenes[44]).

- Instalación de barreras naturales alrededor de las instalaciones, tales como vegetación y muros de suelo u otros materiales. Materiales orgánicos (tales como la vegetación) y la tierra tienen una gran capacidad de absorción del ruido, y de ahí su importancia en estos temas.



Barreras naturales (árboles) o seminaturales (con bloques y tierra) (imágenes[45,46]).

- Optimizar las rutas de tráfico interno para minimizar las necesidades del retroceso de vehículos (así se evita la alarma de retroceso) y maximizar las distancias a los trabajadores.
- Se debe usar la excavación mecánica en la medida de lo posible para evitar el uso de explosivos.
- Usar planes específicos para las voladuras, corregir los procedimientos de carga y dimensión de las voladuras.
- Crear un diseño de voladura que incluya un estudio de las superficies a detonar.
- Desarrollar controles de vibración y de excesos de presión con cuadrículas adecuadas de perforación.
- Diseñar adecuadamente las bases de los equipos de molienda primaria y otras fuentes importantes de ruido.

Aparte de estas medidas generales huelga decir que los trabajadores deberán contar con el material adecuado, nos referimos a protectores auditivos. Algunas consideraciones al respecto nos indican que el protector debe ser el idóneo para el tipo y nivel de ruido específico; esta materia está tratada en las diferentes legislaciones laborales de los países. Tampoco la protección debe ser excesiva, ya que si es así el trabajador quedará "aislado" del entorno, siendo incapaz de oír instrucciones verbales o indicadores acústicos de alarma.



Protectores auditivos de orejeras y tapones (imágenes[47,48]).

Además el protector deberá ser cómodo, siendo este un aspecto de vital importancia: el trabajador debe "querer" o al menos "tolerar" adecuadamente el uso del protector. De otra manera acabará quitándoselo con el consecuente daño para su salud.




Viejos y nuevos tiempos (imágenes[49,50]).

Polvo. Como ya hemos comentado anteriormente a lo largo de esta obra, el polvo es un problema que se agrava en aquellas minas que se encuentran en zonas de escasa pluviosidad donde además existe un importante tráfico de camiones. Estos a su vez son considerados la principal fuente de generación de polvo.

> *… Since haul road activity has been identified as the largest contributor to dust generated at surface mining sites, it is reasonable to assume that this source will be a significant component of exposure for mobile surface workers. In 2011, NIOSH plans to evaluate a new water truck application technique based on ground speed instead of engine rotation that may improve dust control by eliminating under-watering conditions …*
>
> *NIOSH (2011)*

Medidas correctoras: Las técnicas de abatimiento y/o supresión del polvo incluyen las siguientes (ELAW, 2010):

- Aspersión de agua y aditivos aglomerantes en los caminos y zonas de trabajo.



Camión "regando" las pistas de transporte en una mina a cielo abierto (imagen[51]).

- Optimizar los patrones de tráfico de camiones y otros vehículos pesados, así como la reducción de la velocidad de los mismos.

- Se deben replantar y cubrir pronto los suelos expuestos y otros materiales erosionables.
- Solamente debe quitarse la protección vegetal de las áreas nuevas cuando sea absolutamente necesario.
- Las superficies deben replantarse (si la actividad ha cesado) o tomarse medidas para evitar la formación de polvo cuando las áreas de trabajo estén inactivas.
- El almacenamiento de material polvoriento debe hacerse en instalaciones cerradas u operarse con medidas eficientes de abatimiento del polvo.
- La carga, transferencia y descarga de materiales debe realizarse a alturas o caídas mínimas, y deben protegerse del viento, así como considerar el uso de sistemas de aspersión para la supresión del polvo durante tales operaciones.
- Las cintas transportadoras de mineral deben estar cubiertas.

Por descontado que el personal de mina directamente afectado por el polvo deberá utilizar mascarillas que le permitan filtrar partículas dañinas de polvo.

Gases y material particulado: El principal problema ambiental con los gases y material particulado en las instalaciones mineras proviene de las fundiciones de sulfuros metálicos. Las emisiones de SO_2 no solo son nocivas para los trabajadores de la instalación sino que aquí hablamos de problemas que trascienden el ámbito local e inducen la lluvia ácida en zonas alejadas. En lo que respecta al particulado, este puede ser principalmente arsenical lo cual es muy grave.

Medidas correctoras: Tanto la emisión de gases de azufre como el particulado aéreo mineral están sujetos a la legislación de cada país. Por ejemplo, CODELCO (Chile) capta los gases para producir ácido sulfúrico (H_2SO_4) en una planta de limpieza de gases. En la planta los gases se someten a complejos tratamientos de lavado, rociado, ionización, enfriado y reacción catalítica, hasta transformarlos y obtener ácido sulfúrico (Oyarzún y Oyarzun, 2011). El ácido así producido tiene que ser entendido como un subproducto económico más del proceso de fundición. Parte del ácido sulfúrico producido es utilizado en procesos industriales de CODELCO (para lixiviación de cobre), y el resto es comercializado a otras empresas mineras (Codelcoeduca, 2011).

Dependiendo de la concentración de SO_2 en los gases de escape pueden existir dos procedimientos para la transformación a H_2SO_4 (Borgelt, 2000). El primero se denomina "de contacto" (*contact process*) y es adecuado para altas concentraciones de SO_2 en los gases de salida (> 5% SO_2). En este proceso el

dióxido de azufre es primeramente oxidado a trióxido en presencia de vanadio como catalizador:

$2SO_{2\,(g)} + O_{2\,(g)} \longrightarrow 2SO_{3\,(g)}$

A continuación el trióxido de azufre es absorbido en H_2SO_4 al 97-98% para formar óleum ($H_2S_2O_7$), y luego el óleum es diluido con agua para formar finalmente ácido sulfúrico concentrado:

$H_2SO_{4\,(l)} + SO_3 \longrightarrow H_2S_2O_{7\,(l)}$

$H_2S_2O_{7\,(l)} + H_2O_{\,(l)} \longrightarrow 2H_2SO_{4\,(l)}$

El otro proceso es llamado “ácido sulfúrico en húmedo” (*wet sulfuric acid process*) y es utilizable para concentraciones de SO_2 más bajas (Borgelt, 2000). Al igual que en el caso anterior, el dióxido de azufre es primeramente oxidado a trióxido en presencia de vanadio como catalizador:

$2SO_2 + O_2 \longrightarrow 2SO_3$

Por su parte el trióxido de azufre es hidratado para formar ácido sulfúrico.

$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_{4\,(g)}$

Por último, el ácido (gas) es depositado como ácido líquido (97-98% H_2SO_4) por condensación.

$H_2SO_{4\,(g)} \longrightarrow H_2SO_{4\,(l)}$

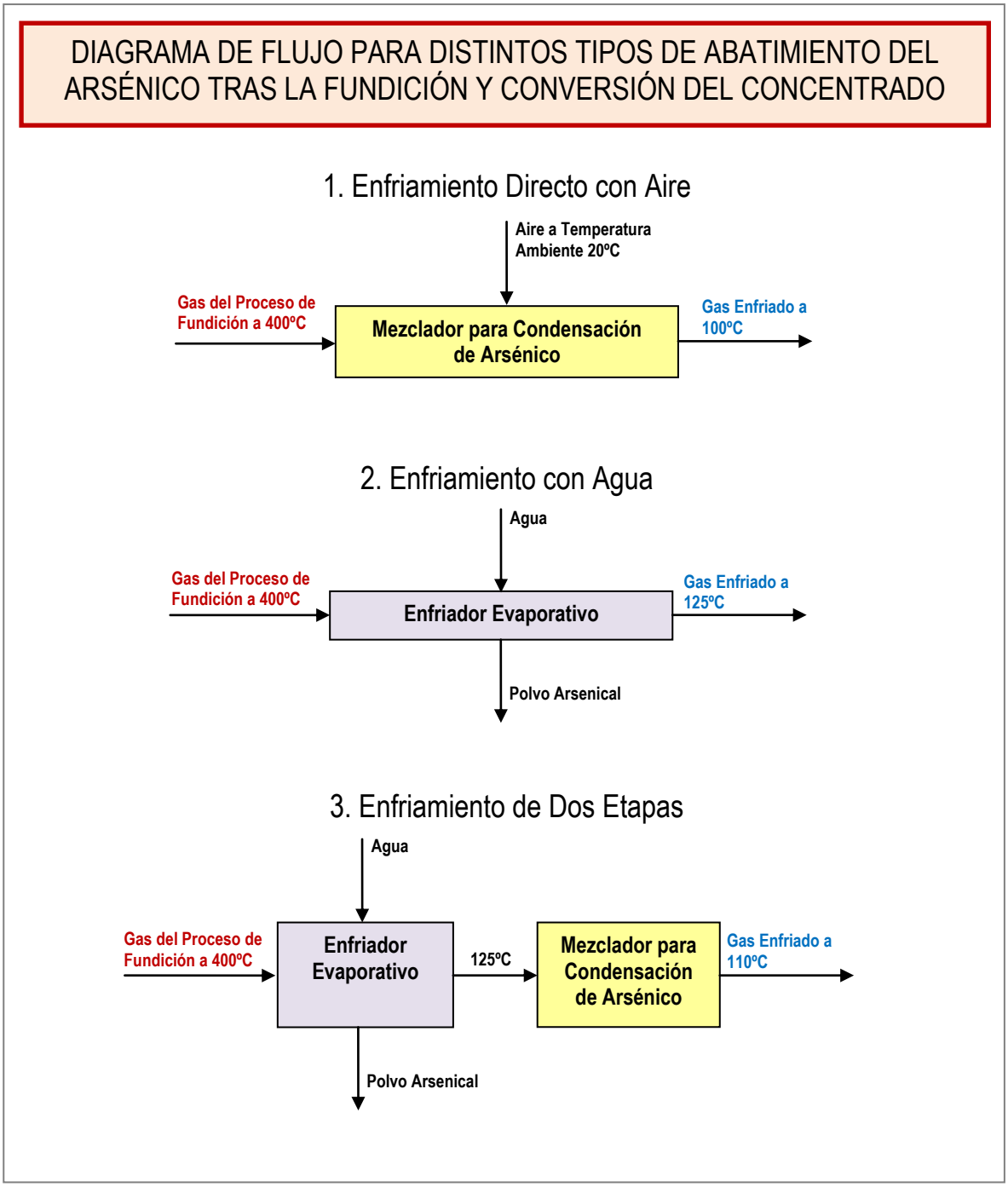


Plantas de ácido sulfúrico asociadas a fundiciones de cobre (imágenes[52,53]).

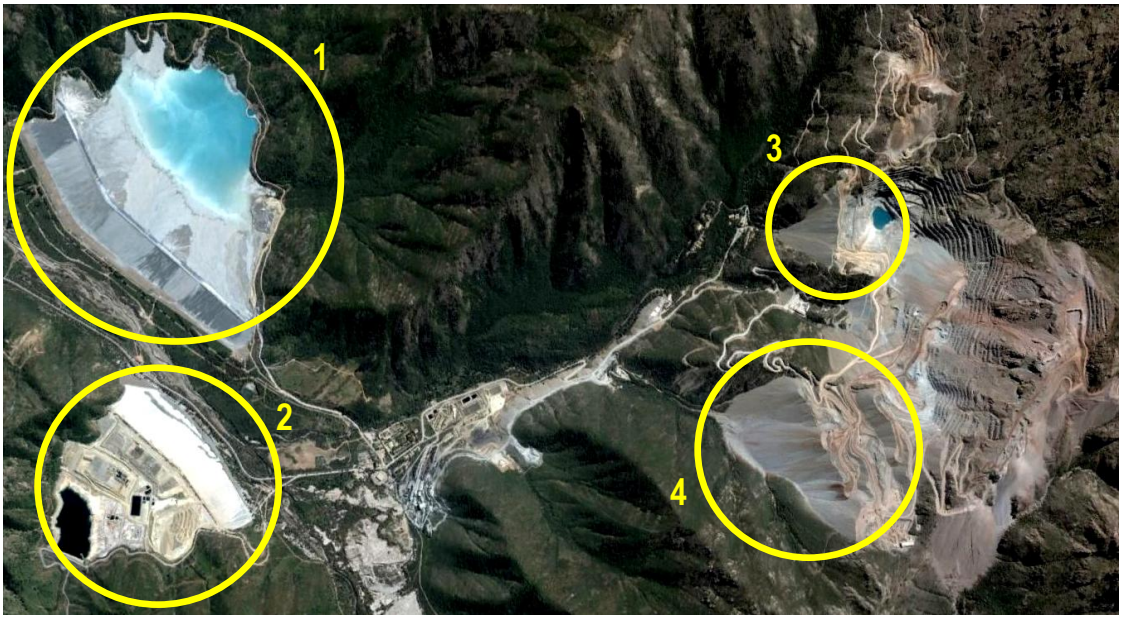
En lo que respecta al particulado arsenical, en mayor o menor grado y dependiendo del mineral de mina, casi todas las fundiciones de cobre se enfrentan a un problema común: el arsénico (Oyarzún y Oyarzun, 2011). El proceso de fundición genera especies de arsénico solubles que deben ser removidas en la

fase de generación de ácido sulfúrico (ver párrafos anteriores para el SO_2) (Dalewski, 1999). En el sistema de gases a alta temperatura (600–800°C) la especie trivalente de arsénico se encuentra como As_4O_6. Durante el enfriamiento final, el arsénico empezará a precipitar a unos 200ºC y el proceso se completará a 40-80ºC. De esta manera, la calidad del ácido sulfúrico dependerá de la concentración de arsénico. Existen tres procedimientos para abatir el arsénico (Dalewski, 1999): 1. Enfriamiento directo de los gases con aire. 2. Enfriamiento directo de los gases con agua. 3. Proceso en dos etapas. De esta manera, antes de los gases ingresen en el circuito de producción de ácido sulfúrico, la mayor parte del arsénico será eliminada como trióxido de arsénico (As_2O_3).

DIAGRAMA DE FLUJO PARA DISTINTOS TIPOS DE ABATIMIENTO DEL ARSÉNICO TRAS LA FUNDICIÓN Y CONVERSIÓN DEL CONCENTRADO



Residuos mineros (*aspectos físicos*): Aparte de los problemas relacionados con el drenaje ácido y la dispersión de metales y metaloides, las balsas (*relaves*) y escombreras (*botaderos*) pueden presentar serios problemas de estabilidad, particularmente en zonas sísmicamente activas, con una orografía compleja y fenómenos tormentosos. En este apartado tiene que quedar muy claro que si existen poblaciones aledañas al curso fluvial donde se asienta una balsa, el margen para fallos es "cero".

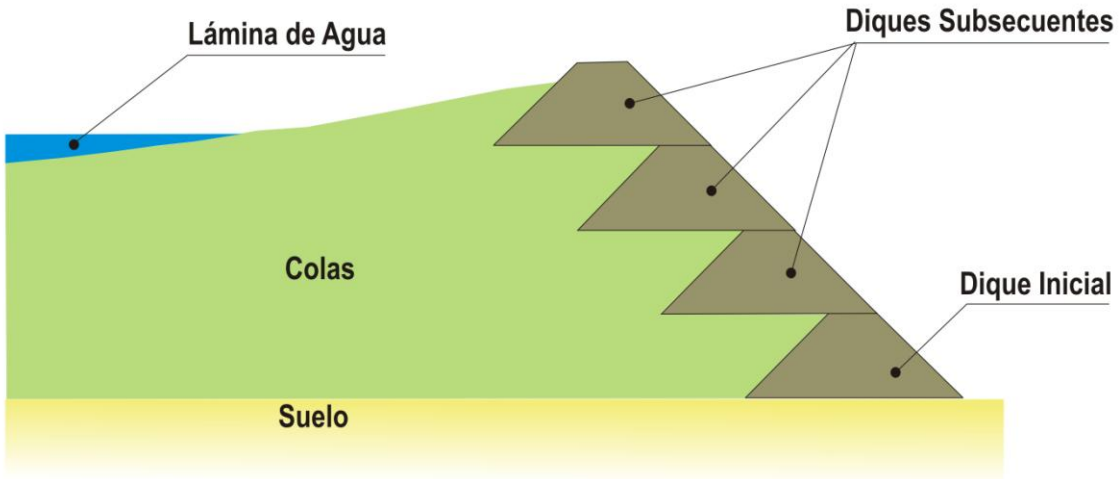


Mina de cobre a cielo abierto El Soldado (Chile) donde se muestran diversos riesgos en un paisaje dominado por estrechos valles, sujeto a fuertes precipitaciones en determinados años, y correspondiendo a una zona sísmicamente activa. 1 y 2: balsas (relaves); 3 y 4: escombreras (botaderos). La imagen tiene unos 7,2 km en dirección E-W; el Norte está hacia arriba. Imagen Google Earth. Tomada de Oyarzún y Oyarzun (2011).

Medidas correctoras: WISE (2004) indica las siguientes recomendaciones de seguridad para la planificación, construcción y monitoreo de balsas.

Planificación

- Estudio del sitio de emplazamiento: geología, sismicidad, clima, nacientes del río.
- Estudio de los peligros potenciales: tormentas, inundaciones, terremotos.
- Análisis anticipado de una rotura del dique de contención: trayectoria que seguirían los depósitos de la balsa, uso de la tierra aguas abajo.
- Tener claro que las balsas construidas por el sistema de aguas arriba son particularmente peligrosas y difíciles de manejar en una emergencia.



Típica balsa construida "aguas arriba" mediante sucesivas adiciones de diques de contención. Un modelo que entraña múltiples peligros. Adaptada de WISE (2004). Tomada de Oyarzún y Oyarzun (2011).



Balsas aguas arriba. A la izquierda, Grizzly Gulch (South Dakota) (USGS, 2007); a la derecha, Balsa de la Highland Valley Copper Mine en la Columbia Británica (Canadá) (Tailings.info (2010a).

Construcción

- Desarrollo de un programa de control de calidad para los materiales empleados y la técnica escogida.
- Vigilancia a través de un monitoreo sistemático del nivel freático, movimientos en la balsa, control de la calidad de las aguas más allá del dique.

Tailings.info (2010b) indica además lo siguiente con respecto a la planificación y construcción:

- Estudiar la historia de otras instalaciones equivalentes en la zona.
- Determinar la propiedad de la tierra, los derechos y límites.

- Determinar donde se localizarán las futuras explotaciones.
- Determinar la flora y fauna protegidas.
- Estudio del clima.
- Determinar la geología y condiciones sísmicas.
- Determinar la superficie de gestión del agua, desvío del río (para construir la balsa), y tema de inundaciones.
- Determinar la proximidad a los residentes locales o infraestructuras.
- Determinar la proximidad a las fuentes de agua potable locales.
- Determinar el potencial para una expansión del proyecto minero.
- Definir la distancia y la elevación de la planta de flotación.
- Controlar problemas de infiltración.
- Determinar el potencial para recuperar ambientalmente la zona.
- Determinar los requisitos legales.
- Recabar los datos históricos del sitio.
- Determinar la facilidad de acceso al sitio de operaciones incluido el acceso de emergencia durante condiciones de tormenta.

Con respecto a las escombreras muchas medidas precautorias son equivalentes, empezando por "donde" las dispondremos. Si observamos las escombreras de El Soldado, veremos que están localizadas en un sitio poco adecuado, particularmente tomando en cuenta el carácter sísmico de la zona.

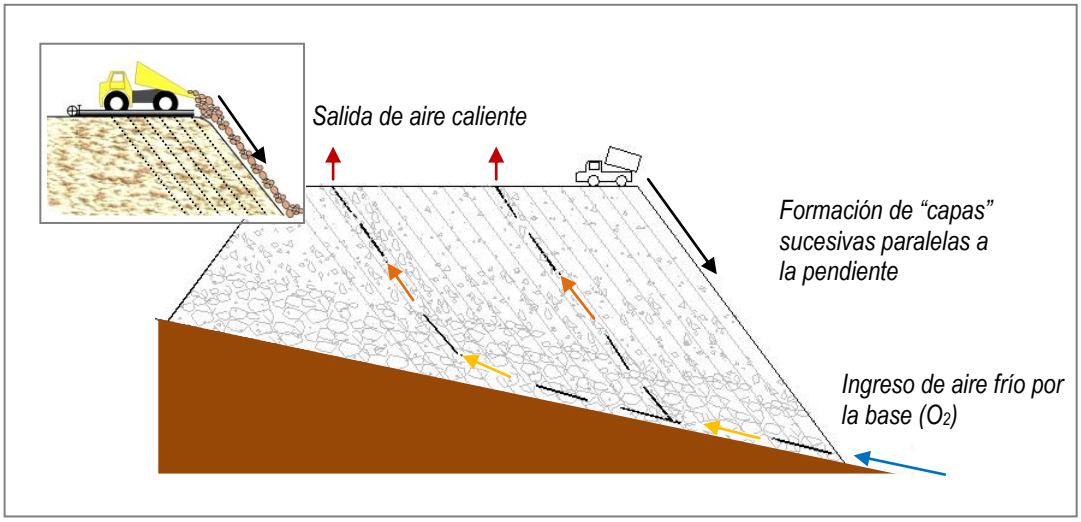
En cuanto a la preparación de la "escombrera" y su uso final deberíamos dar los siguientes pasos (Caldwell, 2006):



Diseño y disposición de escombreras (Caldwell, 2006). A la izquierda, diseño en terrazas, una morfología que se debería evitar en el plan final de cierre.

- Modelización del ángulo de talud para casos estático, sísmico y de remoción en masa por inundaciones.
- Estudios de largo plazo para establecer cómo la escombrera encajará como parte integral del paisaje.

- Plan de operaciones de la escombrera.
- Plan de seguridad y salud de los trabajadores.
- Plan de contingencia en respuesta a emergencias.
- Plan de cierre.
- Plan de monitoreo y mantenimiento posterior al cierre.



Estructuración interna de una escombrera a medida que crece. Algunas "capas" tendrán mayor granulometría y por ahí se moverá de preferencia el aire que entra por la base. A su vez este aire contribuye de manera importante a la oxidación de la pirita contenida en los materiales subeconómicos. Adaptada y modificada de Caldwell (2006).

En cuanto al plan de cierre Caldwell (2006) sugiere lo siguiente:

- Que se diseñe la forma final basándose en análogos morfológicos del entorno (ver además el Anexo 2).
- Que la escombrera no sea más estable que las áreas adyacentes no perturbadas; así se recomiendan ángulos de pendiente suaves y pequeñas lagunas de drenaje.
- Que el frente final tenga una forma cóncava.
- Evitar terrazas y bancos que sigan la topografía.
- Utilizar programas de ordenador (software computacional) que permita predecir los perfiles de erosión.
- Evitar el uso de materiales manufacturados como cañerías de acero o cemento y obras de hormigón.
- Que el diseño tome en cuenta eventos naturales extremos, tales como terremotos y grandes tormentas.
- Que al diseño final se incorporen humedales y pequeñas lagunas para atenuar la remoción en masa.

Aspectos socioeconómicos: La idea economicista de un proyecto minero es que este creará puestos de trabajo y riqueza. Aunque esto es cierto, hay tres aspectos en los cuales nos deberíamos detener un momento. Primero, en "quienes" y "cuantos" conseguirán esos puestos de trabajo, ya que obviamente no serán "todos" los habitantes de una comarca; segundo, "donde" se concentrará la riqueza (la que suele migrar a los grandes centros urbanos, especialmente las capitales); y por último el daño que el proyecto minero pueda realizar al entorno como medio de subsistencia y como parte de un paisaje que puede presentar un valor "espiritual" para los habitantes locales.

> ***Tambo-Arequipa**.- La Asamblea Popular del Frente Amplio de Defensa del Valle de Tambo, con bases zonales en los cinco distritos del Valle, ha ratificado su lucha por la Defensa del Valle de Tambo, su derecho constitucional a un ambiente sano y a una vida digna y la exigencia a los gobernantes para respetar y hacer respetar la determinación de la Consulta Popular del 27 de setiembre del 2009 que excluye a la Minería como opción de desarrollo. Han decidido Reiniciar la Huelga Indefinida, frente a la pretensión del gobierno nacional de imponer la minería en el Valle, defendiendo los intereses de la Southern Copper Corporation y de los otros 12 titulares de las concesiones mineras en el 90% del Valle próspero de Tambo. El gobierno ha establecido un cerco legal, represivo y mediático alrededor del "Plan de Participación Ciudadana" durante el mes de enero, para allanar su objetivo de "formalizar la aprobación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Tía María" en este mes hasta el 02 de marzo que se cerraría la opción para presentar observaciones.*
>
> *(OCMAL, 2011).*

Las variables que aquí pueden intervenir son casi infinitas y no existen respuesta fáciles en esta materia, pero valga decir un par de cosas. Primero, el proyecto minero debería presentar indicios de sostenibilidad; y segundo, como consecuencia de lo anterior, la empresa debería reunirse con los habitantes locales y discutir en plan de equidad con los mismos los pros y los contras del proyecto. Esto es particularmente importante cuando hablamos de pueblos indígenas, que a nuestro juicio son los más vulnerables en los casos de minería y explotación de hidrocarburos.



Melanesios de las Tierras Altas de Papúa Nueva Guinea, la región donde se concentra la minería del cobre-oro (imágenes[54]).

Las medidas correctoras que se plantean a continuación no son solo aplicables a comunidades indígenas, ya que si se analizan con propiedad, también son de interés en países en los que no se dan estas circunstancias pero donde no

obstante existen comunidades rurales muy alejadas de los grandes centros urbanos, como pequeños pueblos en América del Norte o Europa.

Oyarzún y Oyarzun (2011) discuten estos temas en profundidad, por lo que aquí nos limitaremos a realizar un breve extracto de algunas de sus ideas más importantes en este tema.

Medidas correctoras: Aclaremos que cualquier medida que una empresa responsable vaya a adoptar tiene que pasar forzosamente por la idea de sostenibilidad. ¿Es "rentable" para el operador llegar al punto en que hay que litigar y al mismo tiempo "dañar la reputación empresarial" ante la sociedad? Este es el tipo de preguntas que tendrían que plantearse las empresas que van a operar en tierras remotas. En este sentido, basta con implementar inicialmente una serie de políticas y garantías sociales, de mutua satisfacción y obligado cumplimiento, para que las cosas funcionen adecuadamente. Por ejemplo (basado en: MMSD, 2002):

1. Dejando claro que la soberanía de los pueblos es y será respetada, e incluso reforzada.
2. Que los derechos de acceso a las tierras están y estarán asegurados.
3. Que las dos partes, pueblos indígenas y operadores dejen claras sus posiciones antes de proseguir con las conversaciones.
4. Que lo deseable es que los pueblos indígenas obtengan una información adecuada sobre los hechos.
5. Que los operadores expliquen claro y completamente cuáles son sus planes, acuerdos, y arreglos financieros para con los pueblos indígenas; que esto sea realizado de la manera correcta y en el lenguaje adecuado.
6. Por su parte, que los pueblos indígenas dejen claros cuales son los posibles riesgos a los que se enfrentan debido a una operación de extracción.
7. Que se dejen claros de manera rápida los canales institucionales que quedarán abiertos (en caso necesario) para el pago compensatorio por parte del operador en relación a los riesgos expresados en el punto anterior.
8. Los beneficios económicos que recibirán los pueblos indígenas de la operación de extracción.
9. Que los pueblos indígenas, como grupo informado, tendrán el derecho de rechazar o modificar decisiones del operador que afecten a su futuro.
10. Si la restauración de un hábitat dañado fuera imposible, entonces el operador debería proporcionar un hábitat equivalente o mejor.
11. Que los derechos humanos y civiles sean respetados.
12. Que el enfoque del encuentro entre los indígenas y operadores esté puesto sobre las relaciones sociales de los primeros, que son las que guían el uso sostenible de los recursos naturales del entorno.
13. Desarrollar un procedimiento económico que tenga en cuenta las necesidades de un pueblo que seguirá donde está por generaciones y las

de un operador que funcionará en una dinámica de tiempo infinitamente más breve (comienzo y final de proceso extractivo).

14. Buscar un garante que asegure que todas las cifras económicas pactadas serán pagadas.



La idea de sostenibilidad, que cada vez cala más hondo en las empresas mineras. Imagen de una página web de una empresa minera que opera en Indonesia: BJK Mining (2011).

Esta es una lista de buenas ideas, no un protocolo de obligado cumplimiento. Cada operador deberá eso sí extraer lo mejor de estas ideas con el fin de conseguir acuerdos justos y duraderos con los pueblos indígenas. Por otra parte y como comentábamos anteriormente, estas ideas no tienen por qué estar restringidas a las relaciones operador – pueblos indígenas. También valdrán en el caso de operaciones que puedan llevarse a cabo en países donde no existan esas comunidades, en regiones apartadas pero no obstante habitadas por pequeñas poblaciones, donde la regulación puede ser menos importante o sistemática que en las cercanías de los núcleos urbanos principales.

Mining and Sustainability

The mining industry is increasingly being aware of such issues that should be considered in decision making. At BJK Mining, we have regular social responsibility evaluations to keep track of our performance and realize best practices. Our monitoring encompasses all phases of operation: from exploration to reclamation.

As a mining company, we take the opportunities to contribute in the development of economic and social growth of the countries particularly related to us, via employment, investment and taxation. As much as possible, we create ways to minimize the risks of our operations to the environment brought about by smelting, extraction and others …

BJK Mining (2011)

En lo que se refiere un compromiso con el medioambiente, si previamente se han logrado avances con las comunidades locales, probablemente la parte ambiental esté al menos en parte asegurada. Esto es así porque los habitantes locales son los más interesados en mantener unas condiciones ambientales óptimas que les aseguren una continuidad de las actividades tradicionales, como la agricultura-ganadería, pesca, caza, etc. No obstante, el desarrollar convenios específicos con organizaciones ambientalistas razonables, universidades, o institutos de investigación científica, puede ser también una excelente idea que redundará en indudables beneficios para el medioambiente y para el operador en materia de prestigio ambiental.

4.5 Evaluando y (en lo posible) recuperando zonas "catastróficas"

4.5.1 Pasado imperfecto, amnesia y zonas de desastre

Los que entramos en el mundo de la minería hace ya más de tres décadas no podíamos ni imaginar lo que vendría en los tiempos que se avecinaban. Todo era diferente, tanto en nuestra profesión como en la sociedad. Todavía puede uno ver películas antiguas en la que uno de los protagonistas después de ir a merendar al campo (de *picnic*) dejaba toda la basura "tirada" por ahí. No es que esto se haya acabado ya que aun en países con "consciencia ambiental" (normalmente en la Europa del Norte), muchas de estas cosas siguen ocurriendo.




Tampoco es que hayamos mejorado "mucho" ☺ (imágenes[55,56]).

Bromas aparte, la realidad es que en materia ambiental, y ahora de sostenibilidad, se ha avanzado y mucho, tanto en la sociedad como en la minería en particular. Hubo excesos en el pasado, qué duda cabe, y el único temor que puede uno albergar en este momento, es que por eso de la "teoría pendular" acabemos todos en un especie de culto "neoreligioso" con la naturaleza. Como dice (y con buen juicio) la sabiduría popular: *ni tanto ni tan poco*.

Una típica operación minera en el pasado consistía en la siguiente secuencia de eventos: 1) llegaba una empresa; 2) explotaba el recurso mineral; y 3) se largaba sin más. Lo que quedara allí en términos de "tierra arrasada" no tenía la menor importancia. Ríos y suelos contaminados más allá de lo recuperable en términos de tiempo "humano" eran la tónica. No hace falta remontarse a siglos sino tan solo a unas pocas décadas atrás para reconocer desastres de este tipo.

Prácticamente no existe lugar en el planeta donde no hayan pasado cosas así, y nuestra "curiosa y desmemoriada" (amnésica podría uno decir) consciencia humana nos llevaría a decir, *oh que desastre, como se pudo permitir algo así*. Hipocresía, ignorancia, falsedad, en fin, algo por el estilo, porque damos por bueno que la mayoría, por no decir todo el mundo disfrutó y sigue disfrutando de la

plétora de objetos cotidianos que nos posibilita la minería. Dentro de las grandes hipocresías podría estar la de aquel que convoca mediante telefonía móvil a sus correligionarios para una manifestación contra la explotación del "coltán" (columbita-tantalita) en el Congo. Digamos que sin la minería su teléfono móvil (*celular*) no existiría y tendría que contentarse con hacer señales de humo. Aunque claro, no vayamos a cortar un árbol para realizar tales señales.



Imaginería contra el coltán (imágenes[57,58]). Esto tiene solución fácil, todos tiran sus móviles y se acabó el problema. Alguien podrá decir, entonces usamos la telefonía fija. No, tampoco, porque también esta depende al 100 x 100 de la minería. ¿Soluciones reales? Llevar a como de lugar la idea de minería sostenible en el Congo. Aunque claro está, esto tendría elevadísimos costes, en dinero y vidas humanas porque primero habría que erradicar los grupos militares que allí operan.

Necesitamos los metales y minerales industriales, así como también necesitamos los hidrocarburos. Con respecto a estos últimos, aun si tenemos suerte, mucha suerte y por fin se inventa una batería que "de verdad" conserve la energía eléctrica por largos periodos (¿cuánto dura la batería de su móvil?), nos quedaría por buscarle una solución alternativa a todos los productos que nos da la industria química basada en el petróleo (*ad infinitum*). Al respecto, quizás muchos de los que van por ahí con eslóganes contra la minería y la industria de los energéticos deberían beber un agua mineral que se anuncia en la televisión con el eslogan de "agua baja en tonterías".

A las empresas mineras y de hidrocarburos les decimos: *no todo tiempo pasado fue mejor*; y a los ambientalistas les sugerimos que por favor, antes de decir "no" a todo o casi a todo, entreguen soluciones viables de verdad y útiles a la sociedad. Esa es su gran asignatura pendiente.

En las siguientes secciones revisaremos que se puede hacer por recuperar una zona de desastre ambiental generado por la minería, como evaluar la zona y sobre todo, qué medidas se pueden adoptar para mitigar los problemas causados.

4.5.2 En zona de guerra

Quizás pocos ejemplos ilustren mejor el legado ambiental minero dejado en algunos lugares del mundo como el caso de la Mina Faro en Canadá. Los siguientes son datos aportados por el Faro Mine Remediation Project (2011).

La historia

En 1953 el buscador Al Kulan con la ayuda de otros descubrió el yacimiento de plomo y zinc de Vangorda Creek. Este se localiza unos 48 km aguas abajo de la comunidad de Ross River (Yukón). En su momento el yacimiento fue considerado demasiado pequeño y remoto para ser explotado, pero este llevaría al descubrimiento unos 10 años después del yacimiento de Faro. Cuando se comenzó a estudiar en profundidad el yacimiento de Faro, se dieron cuenta de que habían dado con un depósito de clase mundial de plomo-zinc

Hacia 1965 ya había más de 100 hombres trabajando en la zona, y la empresa minera (Dinasty) había construido incluso una pista de aterrizaje en el sitio. Más tarde, Dinasty se unió a Cypress de California para formar la Cyprus Anvil Mining Corporation. La mina se abrió oficialmente en 1969 y la empresa se convirtió rápidamente en el mayor empleador del sector privado en el territorio. También llegó a representar más de un tercio de la economía del Yukón, y para mediados de los años 1970's Faro se convirtió en la mina más grande de plomo-zinc de Canadá. En un momento, por un breve período, fue incluso la mayor operación a cielo abierto de plomo-zinc en el mundo.

Cost of Faro's toxic tomb to top $450 million

It will take 45 years to seal Faro's toxic tailings off from the rest of the world, making it one of the most expensive mine remediation projects in Canadian history.

Closing Faro's tomb will cost over $450 million and require constant maintenance for at least 500 years. These are the early figures from the Faro Mine Closure plan, now being prepared for an environmental assessment in the fall. Many details still have to be finalized, but this is the first time the daunting, multi-centennial task has been outlined in one coherent plan.

It won't be easy burying the former lead zinc mine. The 25-square kilometer mess consists of 55 million tons of tailings, 320 million tons of waste rock and contaminated spill sites. "Right now, we haven't got the details of the design and specifications for all of the future, but what we do have is a single direction that we can take," said Stephen Mead, the project's senior manager.

The $3.5-billion Federal Contaminated Site Action Plan fund will be paying for the cleanup, and the project will only secure the funding once a finished plan is written over the next several years. The project still has to get a water licence and undergo an environmental and socio-economic assessment. At the moment, the governments spends $7.2 million a year just to maintain the site.

Munson (2009)

En 1988 se abrió una segunda mina en el área denominada Plateau de Vangorda. Vangorda entró en producción en 1990 y el mineral era transportado a la zona de la mina Faro para su procesamiento. La minería continuó de forma intermitente hasta 1998, cuando el último operador (Anvil Range Mining Corporation), buscó protección bajo la Ley de Sociedades y fue puesto en suspensión de pagos.

El problema ambiental

Metales como el plomo y el zinc se encuentran naturalmente en las rocas alrededor de Faro. La lluvia puede liberar estos metales de la roca a través del proceso de meteorización. No obstante, antes de que la mina abriera, este proceso era lento y los metales liberados de forma natural no tuvieron ningún efecto grave en las plantas o animales de la zona.

Sin embargo, debido a los casi treinta años de actividad minera, en la actualidad hay aproximadamente 70 millones de toneladas de colas de flotación y 376 millones de toneladas de escombreras en el Complejo Minero de Faro. Estos materiales tienen el potencial para la generación de drenaje ácido y la liberación de metales en el medio acuático. Además, ciertas bacterias prosperan en la energía almacenada en las rocas que contienen azufre. A medida que utilizan esta energía, las bacterias generan calor y pueden aumentar la cantidad de ácido-metales liberados desde este tipo de rocas. Las bacterias que contribuyen a la producción de drenaje ácido prosperan en el Complejo Minero de Faro, y los científicos predicen que la cantidad de metales liberados seguirá aumentando durante cientos de años.



Vistas de las cortas de Vangorda (izquierda) y Faro (derecha) y sus aguas ácidas ricas en Pb-Zn, (imágenes[59-61]).

En el futuro la liberación de metales podría afectar gravemente a las aguas río abajo del complejo minero-metalúrgico de Faro a menos que se haga algo para controlar el proceso de oxidación-lixiviación. Las principales recomendaciones del plan de cierre y remediación son reducir al mínimo la liberación de metales y ácido, así como tratar las aguas contaminadas antes de que desemboquen en los arroyos que atraviesan el complejo de la mina.

Actuaciones gubernamentales

El complejo minero-metalúrgico de Faro ha sido catalogado como sitio minero de Tipo II. Este término fue asignado por el Acuerdo de Transferencia y Devolución que detalla las responsabilidades y obligaciones ambientales asociados con la transferencia de las tierras que anteriormente estaban bajo la gestión del Departamento de Asuntos Indios y del Norte (INAC) para el gobierno del Yukón.

La clasificación Tipo II se aplica a siete minas en los territorios del Yukón, que se identificaron en el momento de la devolución como operaciones sin la capacidad económica como para emprender acciones de remediación o responder ante potenciales obligaciones legales.

Por lo tanto en la actualidad la responsabilidad financiera sobre el Complejo Minero de Faro reside en el gobierno federal. La financiación del proyecto proviene principalmente del Gobierno Federal de Canadá, del Plan de Acción para Sitios Contaminados (FCSAP). Asuntos Indígenas y del Norte de Canadá es el departamento "custodio" de la mina abandonada.



Una vista del desolado paraje de la Mina Faro en una tarde de Diciembre (imagen[62]).

Según el acuerdo de transferencia y devolución, el cuidado de administración y control de la tierra recae en el gobierno territorial. Como resultado, los dos niveles de gobierno (territorial y federal) han establecido un equipo de gestión conjunto responsable de la coordinación general de los trabajos relacionados con el Complejo Minero de Faro.

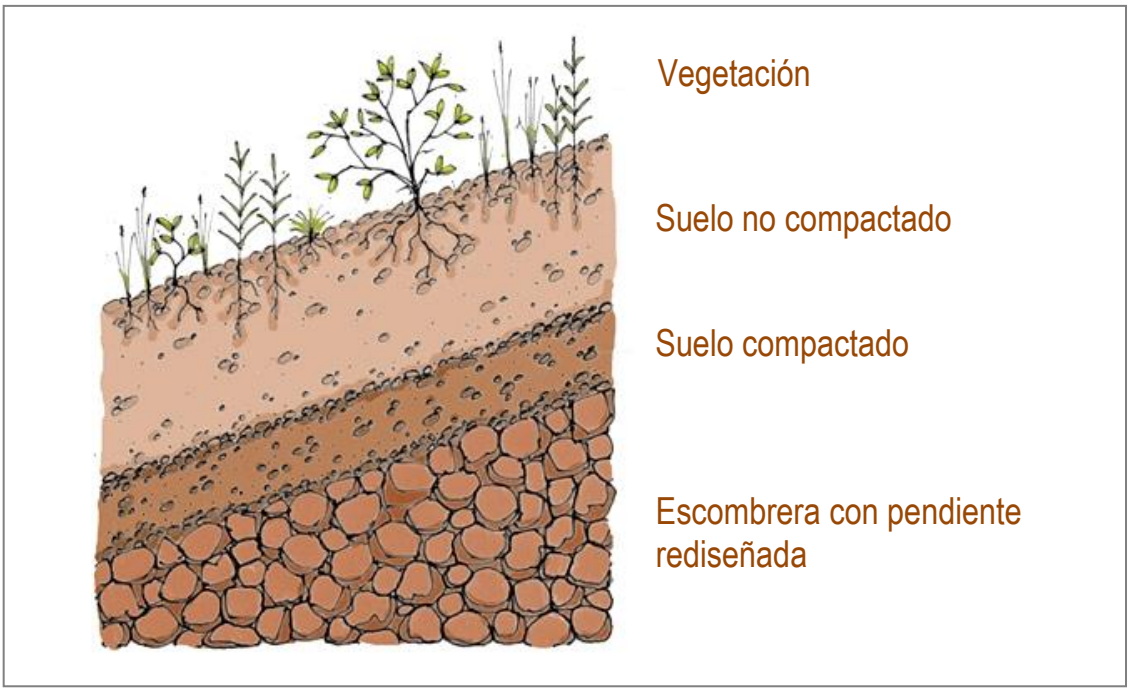
El equipo de gestión conjunto está formado por miembros procedentes del Programa de Sitios Contaminados (Gobierno de Canadá) y del Departamento de Evaluación y Minas Abandonadas (Gobierno de Yukón).

Los planes de actuación

El objetivo general de las actuaciones gubernamentales es llevar a las minas Tipo II al cierre planificado tan pronto como sea posible, implicando a las Primeras Naciones (*tribus*) en el proceso y maximizando los beneficios para los habitantes del Yukón a través de oportunidades de empleo asociadas con los cierres.

Los objetivos generales del programa ambiental para Faro – Vangorda son ante todo (The Independent Peer Review Panel, 2007):

- Proteger la salud humana y la seguridad ambiental.
- Restaurar en la medida de lo posible los compartimentos ambientales de atmósfera, suelos y aguas, incluyendo la protección de peces y vida silvestre.
- Recuperar los terrenos y dejarlos si es posible en condiciones equivalentes a las que había antes de la minería.
- Gestionar los riesgos ambientales e ingenieriles a largo plazo de una manera costo-efectiva.



Restauración propuesta para las escombreras (botaderos) de Faro. Adaptada de Faro Mine Remediation Project (2011).



Una de las opciones de remediación para el sector de las balsas de Faro. A la izquierda, tal cual está hoy en día ese sector; a la derecha, como quedaría después de los trabajos de restauración. Adaptada de Faro Mine Closure (2008).

En tanto que los objetivos técnicos específicos son (Faro Mine Closure, 2008):

- Rediseño de pendientes en las escombreras y cobertura con suelos de las escombreras.
- Revegetación de las cubiertas del suelo y otras áreas.
- Desvío de los cursos de agua dulce apta para el consumo humano en todo el complejo minero.
- Tratamiento de larga duración de las aguas contaminadas.
- Gestión de larga duración de las balsas.
- Almacenamiento de larga duración de las aguas contaminadas en las cortas.
- Mantenimiento a largo plazo de las instalaciones mineras que aún quedan.
- Seguimiento de larga duración de aguas, flora, fauna, etc.

Este es el caso de Faro-Vangorda y sólo cabe preguntarse si esta historia es única en su género o si por el contrario es tan solo un ejemplo entre muchos de lo que solía ocurrir en los viejos o no "tan" viejos tiempos. Al respecto, digamos aquí que hay muchas minas que fueron abandonadas de mala manera (esto es, sin un plan de cierre) y que sin embargo no dan problemas. Por otra parte, el que esas minas no den problemas no significa que las cosas se hayan hecho bien, sino que las explotaciones están localizadas en marcos climático-orográficos que hacen que el nivel de peligrosidad sea bajo. Por ejemplo, si no llueve (< 10 mm/año) o llueve muy poco (< 100 mm/año) los peligros asociados serán escasos. Volviendo a la pregunta inicial podemos decir que desgraciadamente los casos tipo Faro-Vangorda no son para nada aislados, y ejemplos de esta naturaleza los podemos encontrar en todos los continentes con la excepción de la Antártida (donde cualquier explotación minera está prohibida).

A continuación analizaremos los pasos que hay que seguir en la investigación ambiental de minas abandonadas que requieren trabajos de restauración-remediación.

4.5.3 El "CSI" de la minería abandonada

Minas abandonadas las hay por todas partes, da casi igual del país que hablemos, no hay prácticamente lugar donde no se haya desarrollado algún tipo de minería, a lo grande o artesanal, con metales peligrosos para el medioambiente o no. La razón es simple, minería y sociedad caminan cogidas de la mano desde tiempos ancestrales. España y Chile registran una historia minera que se proyecta en siglos y en el caso español incluso milenios. Muchas antiguas minas ya están casi ocultas por la vegetación, otras permanecen ahí como testimonio de un pasado y su legado minero-metalúrgico.

Hay casos y casos, algunas minas solo representan un problema "estético", aunque habrá quienes pueden verlas como atractivos "turísticos". En fin, que depende de las sensibilidades de cada uno. Pero también hay complejos mineros que representan peligros ambientales "reales" y sobre los cuales habría que realizar acciones concretas de ingeniería ambiental.



Antiguas minas de Pb-Zn-(Ag) de Mazarrón (Murcia, España). Los colores de los residuos ya indican que entrañan peligrosidad, y la geoquímica lo confirma (Oyarzun et al., 2011).

Pero todo parte por una "evaluación" sobre la gravedad del problema y en este sentido los trabajos a realizar en los sitios mineros abandonados se parecen en muchos aspectos a la dinámica de algunos episodios de la famosa serie de televisión de la CBS "CSI Las Vegas". Se trata de recoger evidencia de campo y saberla interpretar adecuadamente, sin dejarse llevar por ideas previas o prejuicios. En este sentido, uno de los caracteres de la serie, el Dr. Gill Grisson tiene una excelente frase que dice: *concentrate on what cannot lie — the evidence*.

Esto es básico en la investigación científica y de primera importancia cuando se estudian sitios mineros; de hecho en ocasiones se pueden cometer graves errores de interpretación en una investigación minero-ambiental debido a la existencia de "ideas preconcebidas". Al respecto, nadie está exento de caer en estas trampas, y como muestra ver ejemplos en el apartado 5.2 de esta obra (*Estudiando cuencas hidrográficas en Chile, fallos y aciertos*).

La segunda similitud con la serie CSI Las Vegas radica en que uno trata con "sucesos acaecidos", en nuestro caso con minas o complejos minero-metalúrgicos que cerraron décadas o siglos atrás, y sobre los cuales puede haber escasa información. Pero ahí está la evidencia de campo, en las escombreras, en las balsas, en el drenaje ácido, y en el entorno fisiográfico de influencia de la mina.



Recabando información y pruebas en el lugar de la "escena", a la izquierda CSI Las Vegas (imagen[63]); a la derecha, un equipo de geólogos de la UCLM cerca de Rodalquilar (Almería, España).

Aspectos a considerar en una zona minero-metalúrgica abandonada

Lo primero es definir el "área de influencia" o también llamada, "área de afectación". Como hemos comentado anteriormente, la huella ambiental de un complejo minero-metalúrgico puede extenderse por decenas de kilómetros desde el punto cero. Aspectos básicos a estudiar son:

- El clima. Precipitaciones anuales, existencia (o no) de fenómenos tormentosos recurrentes en el tiempo como El Niño, temperaturas, etc.

- La red fluvial. Existencia de cuencas hidrográficas, ríos potencialmente contaminables.
- La orografía. Donde se localiza el complejo minero-metalúrgico, en una planicie, en las montañas, en la cabecera de un río, etc.

Luego tendremos que entrar en los factores geológicos propiamente dichos:

- El tipo de yacimiento y su encajante. Cada tipo yacimiento tiene su propia problemática ambiental: van desde los que casi no presentan problemas (p.ej., Formaciones Bandeadas de Hierro) a los muy problemáticos por la lixiviación de metales (p.ej., yacimientos epitermales de metales preciosos). La "peligrosidad ambiental" de un yacimiento crece en función del contenido en pirita; de la presencia de metales y metaloides de "alto riesgo" (plomo, cadmio, arsénico, mercurio); del grado de fracturación (mientras más fracturas mayor oxidación-lixiviación). Por último, aunque en absoluto menos importante, nos interesará el encajante de la mineralización, en términos de su reactividad con el ácido sulfúrico generado por la pirita. Si son calizas, los efectos ambientales de la oxidación-lixiviación serán muy limitados. Algo parecido ocurrirá si hay abundantes feldespatos en un encajante volcánico o intrusivo (ver además el Anexo 3).

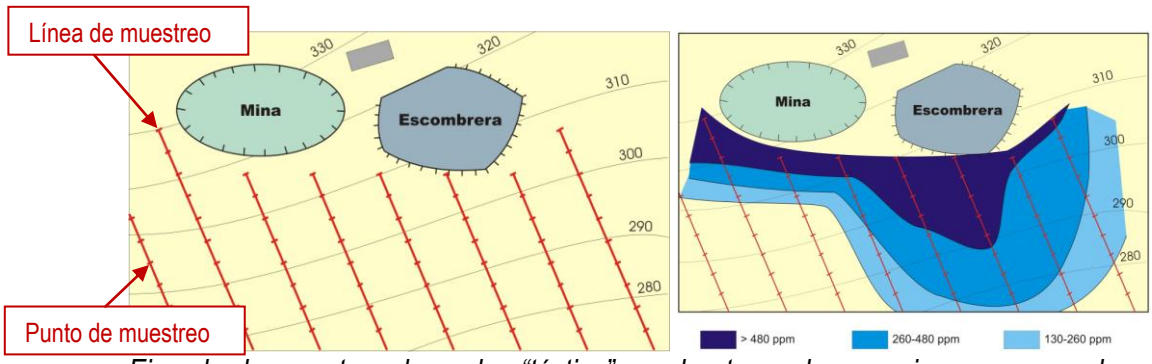


Peor caso posible, yacimiento epitermal en altura (Andes), importante alteración argílica (tonos blancos) con lo cual los feldespatos ya no están para neutralizar el ácido y parar la lixiviación; tonos rojizos que evidencian que la pirita fue oxidada fuertemente → formación importante de ácido sulfúrico → lixiviación de metales y metaloides (imagen[64]).

Habiendo recabando toda esta información, en gabinete y/o en el campo (preferentemente ambas opciones), podemos pasar a la investigación propiamente dicha, que tiene aspectos geoquímicos, geofísicos y mineralógicos.

Geoquímica y Geofísica. En geoquímica debemos definir si muestrearemos aguas, sedimentos fluviales o suelos. Mucho depende de la escala de trabajo. Si volvemos al ejemplo de un complejo minero-metalúrgico localizado en la cabecera de un río, lo recomendable serán aguas y/o sedimentos fluviales. La razón es simple, si el yacimiento entraña riesgos ambientales evidentes (p.ej., hablamos de un epitermal rico en pirita y arsénico), lo lógico será muestrear el ámbito de la cuenca fluvial con potenciales problemas de contaminación (río principal más tributarios que conecten con la mina en altura). Deberemos no obstante muestrear también algún otro tributario (no contaminado) para poder establecer una "línea base". El problema de muestrear aguas radica en la estacionalidad de su hidroquímica. No es lo mismo muestrear un río en época de lluvias que durante la estación seca. Por lo tanto, habrá que muestrear a lo largo de un año como "mínimo", y al menos en cada estación (climatológica) diferenciada. Por el contrario, los sedimentos fluviales son fáciles de muestrear y su variación geoquímica estacional es escasa. Los suelos son aconsejables solo para el entorno inmediato del complejo bajo estudio. ¿Qué elementos químicos? Hoy en día con metodologías analíticas rápidas como la ICP los laboratorios entregan listas inmensas de elementos analizados. ¿En cuales deberíamos centrarnos? Aclaremos bien este punto, debemos centrarnos en unos pocos, si no corremos el riesgo de caer en aquello de que *los árboles no dejan ver el bosque*. ¿Cuáles? Aquellos constitutivos de la mineralización y que puedan acarrear graves problemas ambientales. ¿Dónde realizar el muestreo de detalle (suelos)? Aquí hay que cubrir el área del complejo donde los suelos serán principalmente antrosoles y tecnosoles. Especial énfasis habrá de ponerse en las balsas y sus inmediaciones.

Con respecto a la geofísica, Gómez Ortiz y Martín Crespo (2010) indican que la técnica de tomografía eléctrica puede ser muy útil para caracterizar residuos mineros tales como las balsas (*relaves*). La tomografía eléctrica utiliza la medida de las resistividades de los materiales geológicos sub-superficiales para determinar su espesor y profundidad. En el caso de las balsas existe un buen contraste de resistividad entre los materiales que constituyen el relleno de la balsa y los que definen su base, lo que permite obtener buenos resultados acerca de la geometría y espesores del relleno (Gómez Ortiz y Martín Crespo, 2010).



Ejemplo de muestreo de suelos "táctico" en el entorno de una mina y su escombrera. Para el muestreo de cuencas sugerimos leer el apartado 5.2 donde se trata el tema en extenso.



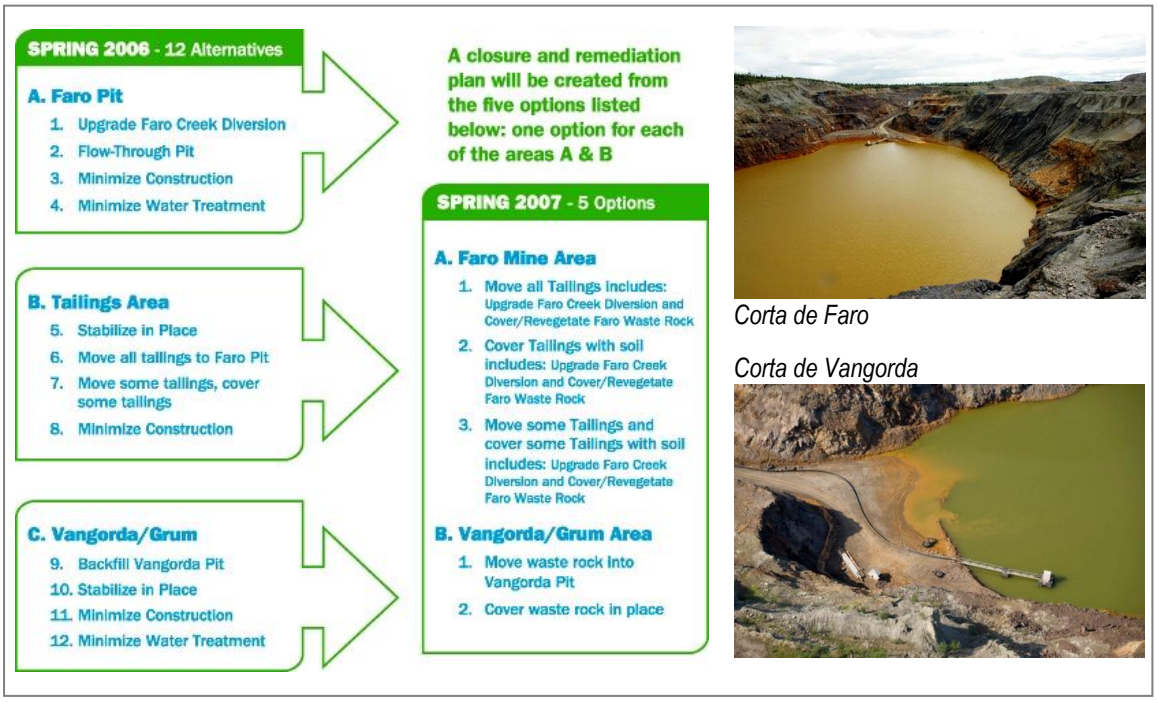
Toma de muestras de sedimentos fluviales en la Cuenca Hidrográfica del Río Elqui (Chile) y equipos para mediciones in situ (oxígeno disuelto en el agua, pH).

- Mineralogía. Se deberá realizar un estudio completo de la mineralogía de mena y ganga del yacimiento, de las balsas y escombreras, de los suelos, y de los sedimentos fluviales, al microscopio óptico y al SEM (y TEM si es necesario). La razón es simple, los metales en dispersión provienen de fases minerales, por lo tanto la secuencia de trabajo será la siguiente: 1) determinar la fase o fases minerales que portan los metales ambientalmente peligrosos; 2) determinar cómo se encuentran esos minerales en las balsas, escombreras, suelos, y sedimentos. Nos referimos a la "especiación" de los metales: ¿han sido adsorbidos por fases oxidadas de hierro? ¿se encuentran ligados a las fases de arcilla (p.ej., esmectita)? ¿o a otra fase mineral oxidada? Si muestreamos aguas habrá que

determinar las concentraciones del elemento tanto en agua filtrada como no filtrada, a fin de determinar si el elemento está en suspensión con fases minerales o disuelto en fase catiónica o aniónica. Todo esto es extremadamente relevante ya que no todas las especies de un metal o metaloide son igual de peligrosas. Por ejemplo, no es lo mismo hablar de mercurio metálico que de metil-mercurio, siendo este último muy peligroso para la salud humana.

Acciones concretas

A los estudios evaluativos que acabamos de revisar les deben seguir acciones concretas, que pasan por el análisis de las soluciones ambientales óptimas (puede haber varias) y la puesta en marcha de las acciones de remediación (p.ej., neutralización del drenaje ácido) y restauración (p.ej., la reinserción del paisaje minero en el contexto geomorfológico local). Otra vía consiste en designar aquellos parajes (una vez controlados los principales riesgos ambientales) como "aulas de la naturaleza" (ver apartado 5.3 *Cuando preservar un desastre podría ser (muy) educativo*), o desarrollar un Parque Minero (tema que trataremos en la siguiente sección) que actúe con fines turístico-educativos.

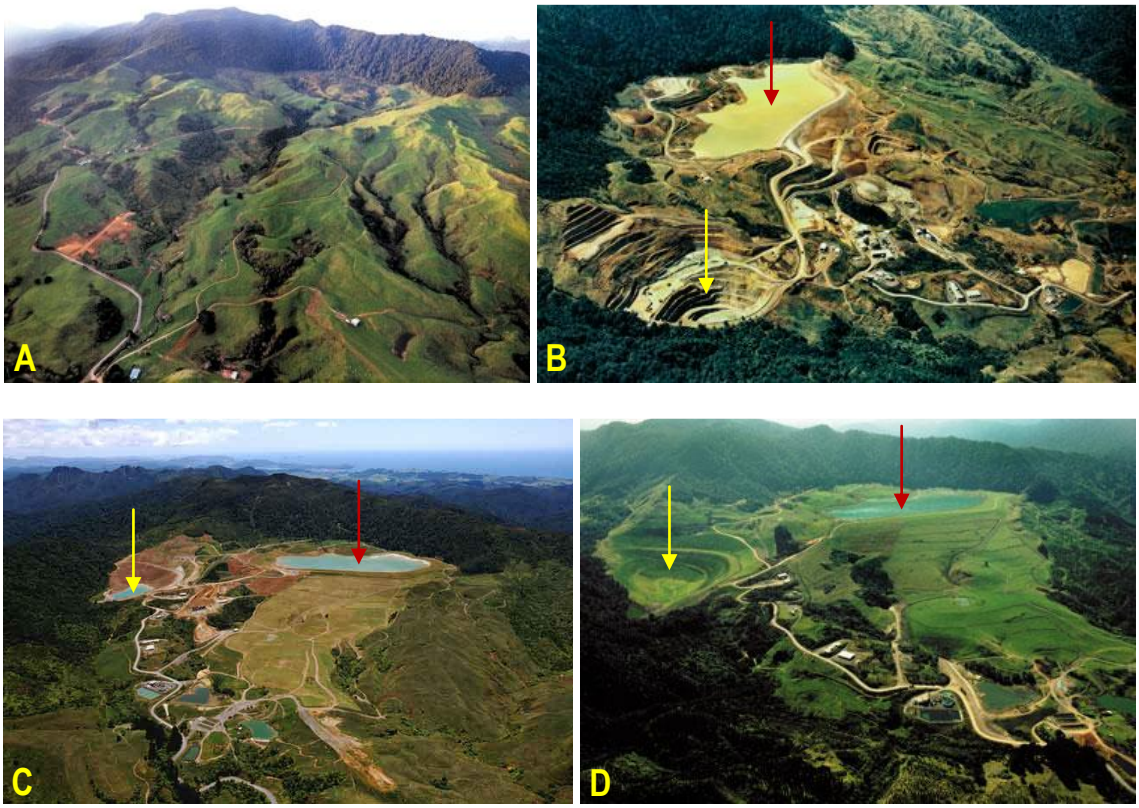


Ejemplo del estudio de alternativas y acciones ambientales a realizar en el área de Faro-Vangorda (ver sección anterior) (imágenes[65-67]).

Si tratamos con un proyecto de remediación-restauración para un antiguo complejo minero-metalúrgico donde se trataban sulfuros metálicos, con o sin recuperación de oro, las siguientes deberían ser las acciones a realizar:

1. Estudio climático de la región.
2. Orografía y geomorfología, regional y local.
3. Estudio de potenciales fenómenos de remoción en masa por fenómenos tormentosos.
4. Estudio geoquímico y mineralógico, a escala regional (cuenca hidrográfica) y/o local (dependiendo del "área de influencia").
5. En base a estos datos, diseño de estrategias para mediar con el problema de las escombreras y balsas abandonadas.
6. En las escombreras. Determinar el potencial para la generación de drenaje ácido y eliminación o control del mismo si corresponde (si las rocas son carbonatadas el peligro será mínimo); alisado de escombreras e integración paisajística de las mismas siguiendo los patrones morfológicos locales; sellado compacto con arcillas impermeables si hay carga sulfurada, seguido de una capa de tierra apta para el desarrollo de la vegetación; sembrado de plantas autóctonas, proceso que puede ser realizado en dos etapas, con una inicial que incorpore especies vegetales fijadoras de nitrógeno (p.ej., leguminosas) para enriquecer el suelo, incluyendo además micorrizas para ayudar a que las plantas posteriores asimilen correctamente el nitrógeno.
7. En las balsas. Como en el caso anterior, "ahogar" la balsa con tierra compactada impidiendo la entrada de oxígeno o aguas oxigenadas al interior para impedir reacciones entre la pirita y el oxígeno. Remodelado geométrico de las balsas e integración paisajística, sembrado de plantas siguiendo los puntos anteriormente reseñados para las escombreras.

A continuación ofrecemos un documento gráfico sobre como una operación de rehabilitación de terrenos mineros puede ser llevada a cabo con gran éxito. Nos referimos a la mina de oro de Golden Cross en Nueva Zelanda (Straterra, 2011). Entre 1895 y 1920 el sitio produjo unas 80.000 onzas de oro. Posteriormente el área recuperó su estatus de tierras de cultivo hasta que una campaña de exploración en los años 1970's y 1980's mostró que la zona aun poseía algun potencial minero. Entre 1991 y 1998 la nueva mina Golden Cross produjo 660.000 onzas de oro y 1,7 millones de onzas de plata. En su momento álgido la mina dio empleo a 243 trabajadores y generó 750 puestos adicionales para quienes trabajaban como parte de empresas de servicios y apoyo. A partir de 1993 la mina Golden Cross pasó a ser propiedad de la Coeur d'Alene Mining Corp. y de la empresa neozelandesa Viking Mining.



Rehabilitación del área minera de Golden Cross (NZ) (Straterra, 2011). A: el paraje en 1990, al fondo el bosque nativo del Parque Forestal de Coromandel; B: la mina en funcionamiento, hemos marcado con una flecha amarilla la corta (rajo) y con otra amarilla la laguna de acumulación de aguas de mina (observe el color); C: cuando los trabajos de rehabilitación ya habían comenzado (1999); D) la zona con los trabajos de rehabilitación ya casi terminados (2001) (imágenes[68,69]).



Rehabilitación del área minera de Golden Cross (NZ). A la izquierda, la zona donde se encontraba el molino; a la derecha, curso de agua restaurado con vegetación riparia nativa (riparia: que crece en las orillas de un río) (imágenes[68]).

Acciones adicionales que deben llevarse a cabo:

- Sellado permanente de la superficie de las labores subterráneas, salvo que la explotación en si tenga algún valor de interés científico (afloramiento importante) o de difusión del conocimiento.

- Estimación del grado de estabilidad de los taludes en minas a cielo abierto o canteras, de tal manera que no representen un riesgo para las personas o animales.
- Remoción de materiales y equipos abandonados.
- Demolición de edificios e instalaciones si no se ha encontrado un uso adecuado para estos (conjunto histórico, parque minero, museo, etc.).



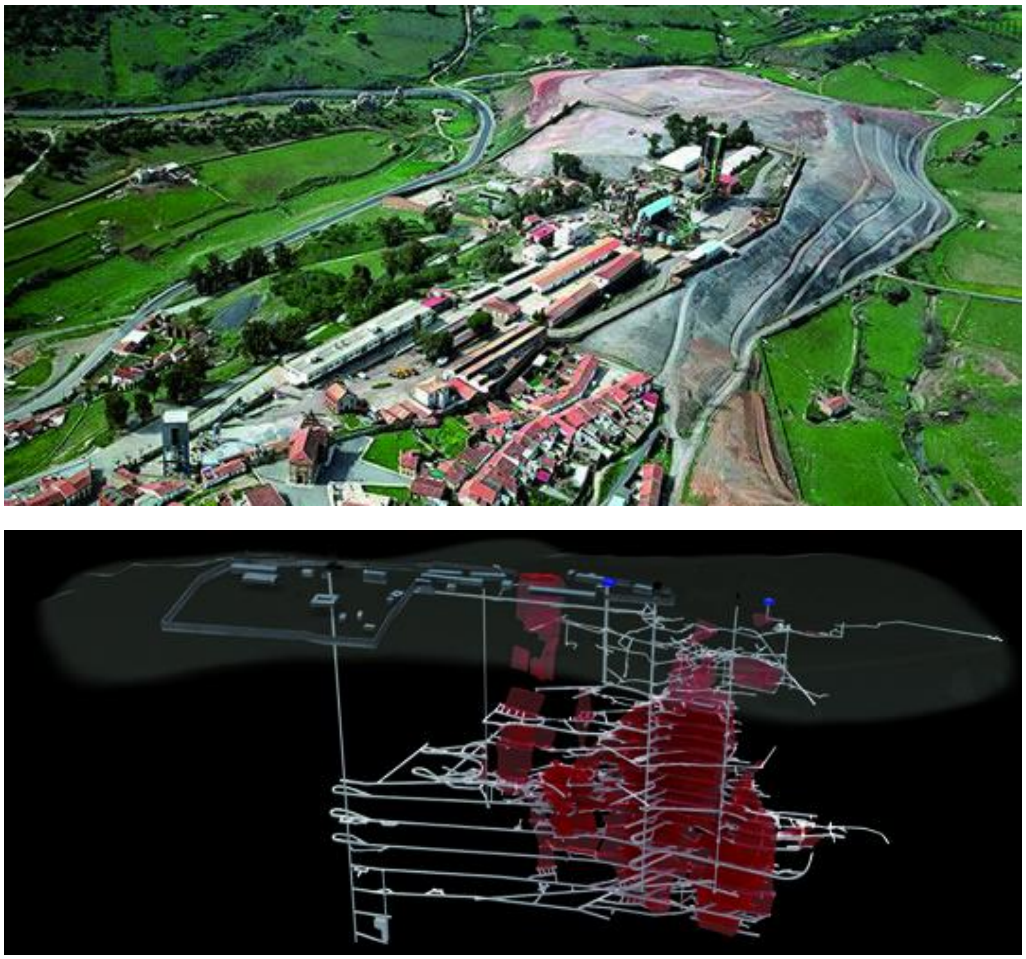
Ejemplos de elementos indeseables en una antigua explotación minera. A la izquierda pala de carga abandonada; a la derecha planta de tratamiento de minerales. Si se desea conservar un edificio, este deberá ser asegurado y se deberán ofrecer explicaciones sobre el uso que tuvo, de otra manera son tan solo ruinas peligrosas.

4.5.4 Otras alternativas, los parques mineros (o minas "museo")

Hay minas y minas, algunas tuvieron su momento de gloria pero luego pasaron al olvido y en su entorno quedaron pueblo fantasmas; en otros casos, aunque las minas cerraran, las poblaciones locales siguieron ahí, los mineros, sus familias, los descendientes. En algunos casos estas minas constituyeron auténticos ejemplos a nivel mundial de tipos de mineralizaciones. Por ejemplo, las minas del distrito de Almadén, desde donde se extrajo "un tercio" de todo mercurio mundial. Otras como Río Tinto constituyen ejemplos extraordinarios de las múltiples interacciones entre un tipo de mineralizaciones y los diversos compartimentos ambientales. Allí el drenaje ácido no es un problema sino que un fenómeno que atrae por igual a turistas y científicos de todo el mundo.

El "Parque Minero de Almadén" (Ciudad Real, España) cuenta con excelentes instalaciones que incluyen (Parque Minero de Almadén, 2011):

- Un centro de visitantes.
- Un centro de interpretación de la minería.
- Una mina subterránea "visitable" con un "tren minero".



Parque Minero de Almadén (arriba) y vista 3D de las labores subterráneas (abajo) (imágenes[70]).

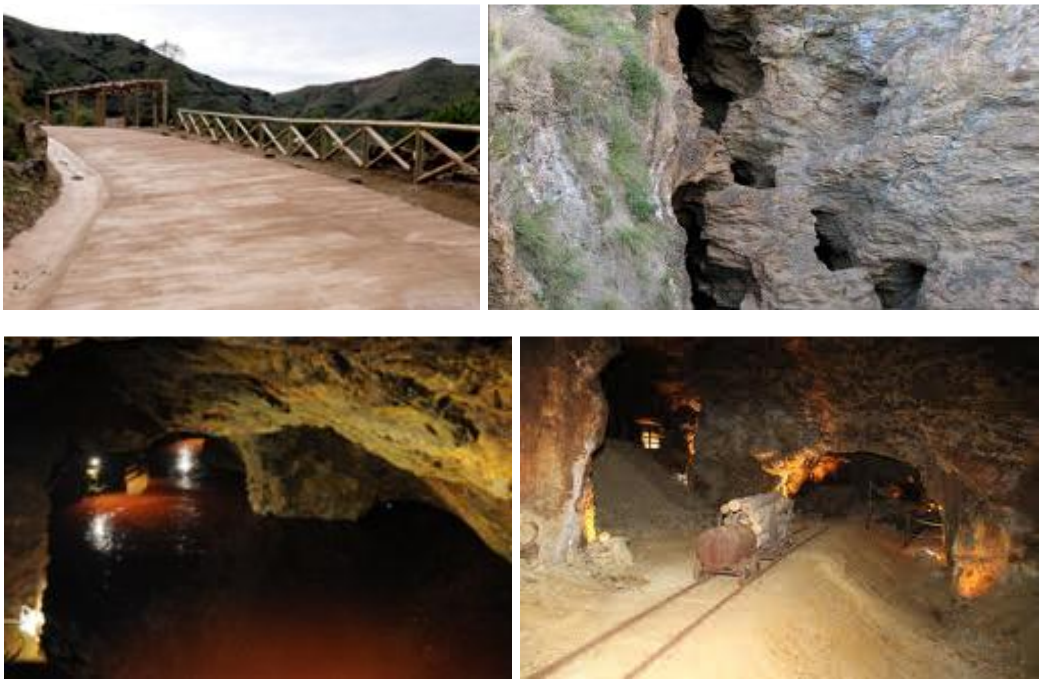
El "Parque Minero de Río Tinto" (Huelva, España) cuenta también con excelentes instalaciones que incluyen un museo y un tren minero que muestra a los visitantes los extraordinarios paisajes del entorno de las minas (Parque Minero de Río Tinto, 2011).



Parte de los extraordinarios paisajes que el visitante podrá observar en su recorrido por el Parque Minero de Río Tinto (imágenes[71,72]).

Por su parte el "Parque Minero de La Unión" (Parque Minero de La Unión, 2011) constituye un auténtico museo al aire libre cuyo eje principal es la Ruta o Camino del 33, antigua senda usada por los mineros para transportar el mineral extraído en la Sierra. A lo largo de esta caminata se pueden observar antiguos hornos de calcinación, explotaciones mineras como las de la Mina Remunerada y su planta concentradora (el "lavadero" que operó de 1920 a 1957). Por último tenemos la

joya de la corona del parque, la Mina Agrupa Vicenta, única mina subterránea de la Región de Murcia acondicionada para la visita del público. Destacan sus espectaculares espacios interiores, de dimensiones extraordinarias. Otros atractivos incluyen algo más arriba en el recorrido la Mina Pablo y Virginia.



Algunas vistas del Parque Minero de La Unión a lo largo de la Ruta del 33. Arriba izquierda, el camino en sí; a la derecha, la Mina Remunerada; abajo las labores subterráneas visitables de la mina Agrupa Vicenta (imágenes[73,74]).

Bibliografía

Atención: *Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.*

Adler, P., 2011. The Ok Tedi negotiations: rebalancing the equation in a chronic sustainability dilemma. http://www.mediate.com/facilitation/keystoneOkTedi.cfm

Aliste, N., Moraga, A. y Álvarez, L., 1966. Efectos del sismo de marzo de 1965. Provincias de Aconcagua y Valparaíso. Instituto de Investigaciones Geológicas (actual SERNAGEOMIN). Boletín nº20, 71 pp. y anexos.

Amezaga, J.M., Rotting, T.S., Younger, P.L., Nairn, R.W., Noles, A.J., Oyarzún, R., Quintanilla, J.A., 2011. Rich vein? Mining and the pursuit of sustainability. Environmental Science and Technology, 45, 21-26.

Australia Water and Rivers Commission, 2000. Water Quality Protection Guidelines for Mining and Mineral Processing no. 10: Above Ground Fuels and Chemicals Storage, http://www.water.wa.gov.au/PublicationStore/first/10142.pdf

Barrick, 2011. Barrick's responsible use of cyanide. http://www.barrick.com/CorporateResponsibility/KeyTopics/CyanideManagement/ResponsibleCyanideUse/default.aspx

BJK Mining, 2011. Mining and Sustainability. Sustainability, BJK Mining, http://bjkmining.net/sustainability.html

Borgelt, B.V., 2000. Options for control of sulfur dioxide emissions at Mount Isa. Supporting Document for Final Report of Mount Isa Mines Limited, Panel Assessment Study. http://www.derm.qld.gov.au/register/p00202aa.pdf

Business News Americas, 2010. Candelaria presenta EIA por planta de desalinización de US$270mn – Chile. http://www.bnamericas.com/news/mineria/Candelaria_presenta_EIA_por_planta_de_desalinizacion_de_US*270mn

Caldwell, J., 2006. Waste Rock Dumps. InfoMine, State of the Art Review, http://technology.infomine.com/WasteRockDumps/

Castillo, J., Sánchez, J.M., Kunze, V. y Araya, R., 2011. Chile: Size Does Matter. En: McMahon, G. y Remy, F. (Eds.), Large Mines and the Community: Socioeconomic and Environmental Effects in Latin America, Canada, and Spain, http://www.idrc.org/mimap/ev-28019-201-1-DO_TOPIC.html

CDC, 2006. Datos sobre el cianuro. Centros Para el Control y la Prevención de Enfermedades, http://www.bt.cdc.gov/agent/cyanide/basics/espanol/facts.asp

Cochilco, 2008. Buenas Prácticas y Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera. Comisión Chilena del Cobre, http://www.cochilco.cl/pdf/libro_final.pdf

Codelcoeduca, 2011. Recuperación y reutilización de los gases producidos en el proceso de fundición. Codelcoeduca.cl, https://www.codelcoeduca.cl/minisitios/sustentabilidad/reutilizar/produccion.html

Dalewski, F., 1999. Removing arsenic from copper smelter gases. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 51, 24-26.

ELAW, 2010. Guía Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros. Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW), http://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Guia%20%20para%20Evaluar%20EIAs%20de%20Proyectos%20Mineros.pdf

Faro Mine Closure, 2008. Faro Mine Closure: Arriving at a Closure Plan. http://www.faromine.ca/assets/files/fmc-options-presentation0108.pdf

Faro Mine Remediation Project, 2011. Home. http://www.faromine.ca/index.html

Freeport-McMoRan, 2011. Candelaria and Ojo del Salado Mines. http://www.fcx.com/operations/Chile_Candelaria_OjosdelSalado.htm

Gómez Ortiz, D. y Martín Crespo, T., 2010. Geofísica en una balsa de lodos de San Quintín Este. Un Documento GEMM, Proyecto de Innovación 123 - UCM - 2010, http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintin_Innova/Geofisica_SQ.pdf

Graham, B. y Reilly, K., 2011. The path to tragedy (Chapter 3). National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, January 2011, https://s3.amazonaws.com/pdf_final/4_OSC_CH_3.pdf

Harper, D., 2011. Geologic hazards - Mine subsidence in Indiana. Indiana Geological Survey, Indiana University, http://igs.indiana.edu/Hazards/Subsidence.cfm

Higueras, P., Oyarzun, R., Iraizoz, J.M., Lorenzo, S., Esbrí, J.M. y Martínez Coronado, A., 2011. Low-cost geochemical surveys for environmental studies in developing countries: testing a field portable XRF instrument under quasi-realistic conditions. Journal of Geochemical Exploration, doi:10.1016/j.gexplo.2011.02.005

Hodza, P., 2010. Fuzzy logic and differences between interpretive soil maps. Geoderma, 156, 189-199.

InfoMine, 2011. Candelaria. http://www.infomine.com/minesite/minesite.asp?site=candelaria

Kennedy, D., 2001. PT Kelian: a case study of global operations. MAC: Mines and Communities, http://www.minesandcommunities.org/article.php?a=1520

Knight Piésold Consulting, 2011. Environmental baseline studies. http://www.knightpiesold.com/en/index.cfm/services/environment-and-permitting/environmental-baseline-studies/

MacRae, A., 2011. Burgess Shale fossils. University of Calgary, http://www.geo.ucalgary.ca/~macrae/Burgess_Shale/

McCloskey, L., Bless, D. y US Department of Energy, 2005. Prevention of Acid Mine Drainage Generation from Open-pit Highwalls—Final Report. Mine Waste Technology Program Activity III, Project 26, http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r05060/600r05060.pdf

MINEO Consortium, 2000. Review of potential environmental and social impact of mining. http://www2.brgm.fr/mineo/UserNeed/IMPACTS.pdf

Minera Pampa de Cobre, 2005. Reglamento de transporte, almacenamiento y manejo de ácido sulfúrico. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/estudios/pampacobre/Reglamento_transporte.pdf

Ministerio de Minas y Energía del Perú, 2011. Guía de Manejo Ambiental de Reactivos y Productos Químicos. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/reactivos.PDF

MMSD, 2002. Breaking New Ground. Mining, Minerals, and Sustainable Development. Earthscan Publications Ltd, London, 441 pp.

Mosquera, C., Chávez, M.L., Pachas, V.H. y Moschella, P., 2009. Estudio diagnóstico de la actividad minera artesanal en Madre de Dios. Fundación Conservación Internacional, http://www.minam.gob.pe/mn-ilegal/images/files/estudio_diagnostico_mineria_artesanal_madredios.pdf

Mudder, T., 2011. Cyanide. Global InfoMine, http://technology.infomine.com/reviews/cyanide/

Munson, J., 2009. Cost of Faro's toxic tomb to top $450 million. Yukon News, http://www.yukon-news.com/news/11195/

NERC, 2011. National soil inventory maps. NERC Soil Portal, http://www.bgs.ac.uk/nercsoilportal/nsi_gallery.html

NIOSH, 2011. Dust monitoring and control highlights. NIOSH Office of Mine Safety and Health Research, http://www.cdc.gov/niosh/mining/highlights/programareahighlights9.htm

NorFalco, 2011. NorFalco - Sulfuric Acid and Sustainable Development. NorFalco Newsletter, http://www.norfalco.com/EN/NewsEvents/News/NorFalco%20Newsletter%20English%20spring2011%20FINAL.pdf

OCMAL, 2011. ¡Adelante en la defensa del Valle de Tambo sin minería! Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina, http://www.conflictosmineros.net/contenidos/19-peru/6739-adelante-en-la-defensa-del-valle-de-tambo-sin-mineria

Ok Tedi Mining, 2008. The Fly River System. Ok Tedi Mining, Community and Environment, http://www.oktedi.com/community-and-environment/the-environment/the-fly-river-system

Olías, M., Cerón, J.C. y Moral, F., 2005. Impacto del vertido de Aznalcóllar en la calidad del agua del río Guadiamar. Geogaceta, 37, 119-122.

Oyarzún, J., 2008. Evaluación de impactos ambientales. Aula2puntonet, Temas Ambientales, http://www.aulados.net/Temas_ambientales/EIA/EIA_Jorge_Oyarzun.pdf

Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Oyarzun, R., Lillo, J., López García, J.A., Esbrí, J.M., Cubas, P., Llanos, W. e Higueras, P., 2011. The Mazarrón Pb–(Ag)–Zn mining district (SE Spain) as a source of heavy metal contamination in a semiarid realm: Geochemical data from mine wastes, soils, and stream sediments. Journal of Geochemical Exploration, 109, 113-124.

Parque Minero de Almadén, 2011. Minas de Almadén. MAYASA, http://www.parqueminerodealmaden.es/

Parque Minero de La Unión, 2011. Inicio. http://www.parqueminerodelaunion.es/

Parque Minero de Río Tinto, 2011. Bienvenidos a la web del Parque Minero de Riotinto. http://www.Parque mineroderiotinto.com/

Passchier-Vermeer, W. y Passchier, W.F., 2000. Noise exposure and public health. Environmental Health Perspectives, 108, 123-131.

Paszkowski, C.A., 2011. Habitat. http://www.biologyreference.com/Gr-Hi/Habitat.html

PRL-ICV-CSCI, 2009. Polvo. Prevención de Riesgos Laborales, ICV-CSIC, http://www.icv.csic.es/prevencion/Documentos/manuales/polvo.pdf

Smithsonian National Museum of Natural History, 2011. What is evolution? http://www.mnh.si.edu/exhibits/darwin/evolution.html

Straterra, 2011. Golden Cross, before-during-after: case study of modern mining. Natural Resources of New Zealand, http://www.straterra.co.nz/Golden+Cross

Striegel, J., Sanders, D.A. y Veenstra, J.N., 2001. Treatment of contaminated groundwater using Permeable Reactive Barriers. Environmental Geosciences, 8, 258-265.

Tailings.info, 2010a. Highland Valley Copper Mine, Logan Lake, BC, Canada. http://www.tailings.info/highland.htm

Tailings.info, 2010b. History of tailings storage. http://www.tailings.info/containment.htm

The Independent Peer Review Panel, 2007. Review of Remediation Alternatives for the Anvil Range Mine Complex: Final Report. http://www.faromine.ca/assets/files/IPRP_FINAL_REPORT_Apr_07.pdf

Tuttle, R.H., 2011. Human evolution. Encyclopædia Britannica, http://www.britannica.com/EBchecked/topic/275670/human-evolution

USGS, 2007. Arsenic Contamination from hard rock mining - Whitewood Creek - Belle Fourche River - Cheyenne River System, Western South Dakota. http://toxics.usgs.gov/photo_gallery/whitewood_creek.html

US EPA, 1994. Acid mine drainage prediction. http://water.epa.gov/polwaste/nps/upload/amd.pdf

US EPA, 2011. What are the trends in contaminated land and their effects on human health and the environment? Contaminated Land, http://cfpub.epa.gov/eroe/index.cfm?fuseaction=list.listBySubTopic&ch=48&s=313

Vanderwerp, D., 2010. Caterpillar D7E - feature test, the green monster: Impressively eco-tech and awesomely destructive. Car and Driver, http://www.caranddriver.com/reviews/car/10q2/caterpillar_d7e-feature_test

Wilkinson Murray, 2010. Independent review of cumulative noise impacts – Camberwell Village. http://www.planning.nsw.gov.au/LinkClick.aspx?fileticket=QHTJY4NwLIA%3D&tabid=70&language=en-AU

Wels, C., Lefevbre, R. y Robertson, A., 2003. Control of Air Flow in Waste Rock Dumps. InfoMine e-Book, http://www.infomine.com/publications/docs/E-Book%2003%20Air%20in%20Dumps.pdf

WISE, 2004. Safety of tailings dams. http://www.wise-uranium.org/mdas.html

Fuentes de las imágenes (a Octubre-Noviembre de 2011)

1. http://kaganga.com/i-want-to-know/grasberg-mine-in-indonesia-big-hole-mine.html
2. http://www.uwec.edu/jolhm/EH/Eslinger/Ok%20Tedi%20Mine%20page.htm
3. http://www.mindoro.com/s/KayTanda.asp?ReportID=195632
4. http://www.desert-survivors.org/conserve.html
5. http://indiancountrytodaymedianetwork.com/2011/02/sioux-forgo-1b-continue-fight-to-reclaim-black-hills/
6. http://www.ushistory.org/us/40b.asp
7. http://www.topwalks.net/images/coriscao/cordillera_cantabrica_02.htm
8. http://1accmcacunqueiro.wordpress.com/2009/02/07/osos-pardos-cantabricos/
9. http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Taxus_brevifolia_Blue_Mts_WA.jpg
10. http://www.drugs-expert.com/taxol-paclitaxel/
11. http://animal.discovery.com/mammals/walrus/
12. http://gulfofmexicomap.com/
13. http://www.cooperaciondesarrollo.com/medio-ambiente/hallado-el-cadaver-de-un-lince-iberico-en-andujar
14. http://enciclopediaanimal.files.wordpress.com/2008/10/lynx_pardinus_defasado.png
15. http://www.allposters.es/-sp/Pollution-Spews-from-a-Copper-Smelter-at-Chuquicamata-Posters_i3986413_.htm
16. http://www.panoramio.com/photo/2125709
17. http://www.panoramio.com/photo/34619978
18. http://www.dpiw.tas.gov.au/inter.nsf/webpages/rpio-4yd7wz?open
19. http://www.e-pol.com.ar/newsmatic/index.php?pub_id=99&eid=53&sid=0&sef=0
20. http://www.cronicadigital.cl/news/pais/16959.html
21. http://www.theaustralian.com.au/business/mining-energy/bhp-billiton-approves-escondida-copper-project/story-e6frg9dx-1226031253078
22. http://www.australiangeographic.com.au/journal/view-image.htm?gid=6491
23. http://www.saharamet.com/desert/photos/photos.html
24. http://www.nationalgeographicstock.com/ngsimages/explore/explorecomp.jsf?xsys=SE&id=1360195
25. http://www.vulgare.net/berkeley-pit-butte-montana/
26. http://www.savetanglelakes.org/SaveTangleLakes/Home/LargeMines/
27. http://dsmapi.blogspot.com/2010/11/central-termica-interior-y.html
28. http://uwcm-geog.wikispaces.com/Acid+Rain
29. http://www.geppertphotography.com/Environmental-Sciences/Point-Sources/14672607_GgFHtz/1/1103236138_45Auf#1103236138_45Auf
30. http://www.treeliving.com/bcs-mining-industry-becoming-more-sustainable
31. http://www.flickr.com/photos/pabloneco/5128747977/
32. http://www.metsoc.org/virtualtour/processes/gold/heapleach.asp
33. http://www.travelpod.com/blogs/1/Chile/Bahia%20Inglesa.%20Chile.html
34. http://botw.org/articles/oh-shit.html
35. http://daveslandslideblog.blogspot.com/2010_10_01_archive.html
36. http://geosyntheticsmagazine.com/articles/0410_f1_backfill.html
37. http://www.constructionphotography.com/Details.aspx?ID=38805&TypeID=1
38. http://www.guydelaporte.co.za/who-is-liable-if-the-property-you-buy-is-contaminated/
39. http://www.soil.ncsu.edu/assist/homeassist/fuel/
40. http://www.seton.com/chemical-and-hazmat-signs-fuel-storage-no-smoking-m9165.html
41. http://www.safetysign.com/Safety+Signs/Flammable+No+Smoking+Signs/J1636/636.html
42. http://www.graysonline.com/sale/4532/mining-quarries/indee-gold-mine
43. http://www.donlingold.com/environment
44. http://www.avtinc.net/barrier_walls/industrial_barriers.html
45. http://www.woodlandtrust.org.uk/en/moretrees-moregood/why-plant/Pages/privacy.aspx
46. http://www.joconl.com/article/id23547
47. http://www.casque-aero.com/index.php?cPath=31&language=en
48. http://www.webmarchand.com/audition.htm?marks=Bilsom
49. http://www.sro.wa.gov.au/collection/mining-records
50. http://www.britannica.com/bps/media-view/108789/1/0/0
51. http://www.real-sonic-bloom.com/Dust_and_Erosion_Control/DirtGlue_Polymer_Emulsion/unpaved_mining_and_construction_roads.htm
52. http://www.outotec.com/pages/Page.aspx?id=10747&epslanguage=EN
53. http://mitchellpayes.com/photo_album.9.html
54. http://saturnic.livejournal.com/341576.html
55. http://dreamshappythings.blogspot.com/
56. http://tallbikeposse.org/wp/?tag=adopt-a-highway
57. http://nordago.pbworks.com/w/page/32327469/coltan
58. http://tribune.com.pk/story/67995/blood-coltan-is-your-cell-phone-soaked-in-congolese-blood/
59. http://www.galloimages.co.za/image/aerial-faro-mine-van-gorda-pit/101883871/2
60. http://www.yukon-news.com/news/11195/
61. http://www.cbc.ca/news/canada/north/story/2007/01/05/faro-plan.html?ref=rss
62. http://www.panoramio.com/photo/18164081
63. http://www.formulatv.com/visor.php?type=4&num=25362&serie=26
64. http://www.worldatlaspedia.com/es/sudamerica-venezuela-cano-veladero/fotografias/detalleFotografia?idLocalizacion=3625457
65. http://www.faromine.ca/ roject/solutions.html
66. http://www.galloimages.co.za/image/aerial-faro-mine-van-gorda-pit/101883871/2
67. http://www.yukon-news.com/news/11195/
68. http://www.straterra.co.nz/Golden+Cross
69. http://www.waihimuseum.co.nz/golden_cross.html
70. http://www.parqueminerodealmaden.es/
71. http://www.visithuelva.com/huelva_autentica/parque_minero_de_riotinto.asp
72. http://turismoactivo.us/2011/02/parque-minero-riotinto.html
73. http://www.ayto-launion.org/turismo.php?subseccion=74&id=257

74. http://www.laopiniondemurcia.es/municipios/2010/02/14/entranas-tierra/229651.html

5.1 El Distrito Minero de Almadén, un caso de contaminación milenaria por mercurio

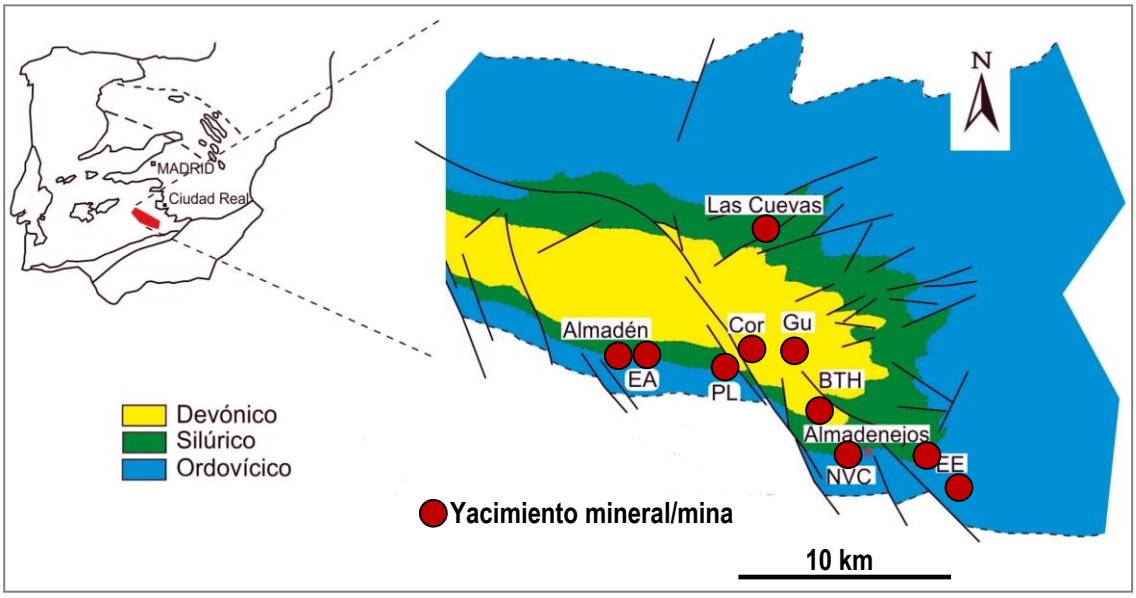
5.1.1 Almadén, algo más que una gigantesca mina de mercurio

Esta sección está basada en varios trabajos, publicados por los autores con la participación de otros colegas, que se encuentran sintetizados en un reciente trabajo monográfico sobre el distrito minero de Almadén (Higueras et al., 2010).

> *The mercury ore has been mined for more than 2000 years, and the oldest reference is from Pliny the Elder, who mentions the area as the site for the best vermilion for the dyes of the togas of the Roman principals.* ***Almadén****, the main mine of the district, has been active from Roman times to present day, with almost no interruptions, except by those caused by mining disasters (floods, fires), or external factors, e.g., wars. Thus, the least one would expect after 2000 years of mercury mining is district-wide contamination, which constitutes the main reason for this study: no other region in the world has been subjected to such an environmental impact for a longer time span.*
>
> *Higueras et al. (2006)*

El distrito minero de Almadén, situado en España sur-central, corresponde a la mayor concentración de mercurio a nivel mundial, habiendo producido un total aproximado de unas 400.000 toneladas de mercurio metálico, que representan del orden de un tercio de la producción mundial del elemento. El distrito incluye seis minas principales, de las cuales la mina de Almadén, situada en el entorno inmediato de esta localidad, es sin duda la más importante, habiendo producido del orden del 95% del total de la producción del distrito. Este hecho ha producido una dispersión del elemento en el entorno inmediato del área (hay que recordar que el distrito tiene una extensión areal del orden de los 150 km^2), que ha implicado una contaminación del área que puede también considerarse como la más importante del mundo.

El distrito de Almadén alberga más de 60 puntos en los que se ha descrito la presencia de cinabrio. De estos 60 puntos, uno es una gigantesca mineralización (Almadén); cuatro son yacimientos de tamaño considerable que han sido objeto de explotación minera continuada (El Entredicho, Las Cuevas, Nueva Concepción y Vieja Concepción); seis constituyen indicios minerales (*prospectos*) que han sido objeto de reconocimiento minero mediante labores superficiales, sin que puedan considerarse propiamente yacimientos (El Alcor, Pilar de la Legua, Guadalperal, Corchuelo, El Burcio, Tres Hermanas); mientras que el resto se pueden considerar simplemente localidades con indicios de mineralización, que sólo han sido objeto de labores de reconocimiento muy superficiales por la escasez de cinabrio.



Geología y principales yacimientos minerales/minas del Distrito Minero de Almadén. EA: El Alcor; PL: Pilar de la Legua; Cor: Corchuelo; Gu: Guadalperal; BTH: El Burcio y Las Tres Hermanas; NVC: La Nueva Concepción y La Vieja Concepción; EE: El Entredicho. Adaptada de Higueras et al. (2006).

Desde un punto de vista geológico los yacimientos de Almadén se pueden agrupar en dos grandes tipos:

1. Diseminaciones estratoligadas en la denominada Cuarcita de Criadero, en la base del Silúrico → Tipo Almadén.
2. Yacimientos relacionados con fracturas o zonas de deformación tectónica en general → Tipo Las Cuevas.

Los yacimientos de tipo Almadén incluyen la Mina de Almadén, ubicada justamente bajo esta localidad. La población se desarrolló sobre y alrededor del yacimiento. Conviene recordar que *Al-maaden*, nombre árabe del que deriva el de la localidad, significa "la mina", lo que da idea de su importancia al singularizarse el nombre en este yacimiento. También la mina de El Entredicho, explotada en Almadenejos a cielo abierto, pertenece a esta tipología, a la que también parece pertenecer la mina de La Vieja Concepción, la peor conocida desde el punto de vista geológico del distrito.

Una característica común de estas mineralizaciones es que son prácticamente monominerales, e incluso prácticamente monoelementales. Por lo general el cinabrio es la única mena metálica reconocible, acompañada de pirita muy minoritaria, y de trazas muy esporádicas de otros sulfuros como calcopirita o estibina. Desde el punto de vista elemental, el mercurio es el único elemento que presenta un factor de concentración de consideración, sin estar acompañado por los elementos que habitualmente le acompañan por su afinidad geoquímica, como arsénico o antimonio entre otros.



Arriba izquierda, cristales de cinabrio con su intenso color rojo (imagen[1]); a la derecha, cinabrio en la mina (actualmente inundada) de El Entredicho (yacimiento tipo Almadén); abajo, gotas de mercurio nativo en La Nueva Concepción (Almadenejos).

Por su parte, los yacimientos del tipo Las Cuevas presentan como carácter común el estar relacionados, de alguna manera, con estructuras tectónicas pero en el detalle tienen una considerable variabilidad. Las morfologías varían desde filoncillos únicos encajados en cuarcitas de edades diversas, como se observa en los indicios de El Alcor (en la cuarcita de Criadero) o Tres Hermanas (en la Cuarcita de Base); haces de filoncillos como en El Burcio (también en la Cuarcita de Base); pasando por filoncillos encajados en rocas magmáticas en Corchuelo; diseminaciones controladas por fracturas en Guadalperal; o yacimientos de cierto tamaño encajados en rocas de diversas litologías afectadas por una deformación de tipo zona de cizalla, como es el caso de Las Cuevas (Higueras et al., 1999). Un caso peculiar, en el que no se ha observado la participación tectónica, es el de la

mina de La Nueva Concepción (Higueras et al., 1997). Otro aspecto destacado de la geología de los yacimientos tipo Las Cuevas es que se relacionan espacialmente con diatremas tipo Frailesca.

> *The sulphide mineral paragenesis of **Las Cuevas** is simple and consists of cinnabar, as the major phase, and minor pyrite, together with native mercury (of probable secondary origin) throughout the deposit. The two first minerals are mainly found in the volcanic rocks and occur as: (a) massive replacements (not previously described for Las Cuevas); (b) infllings in tension cracks; and (c) localized development of mylonitic cinnabar in relation to late thrust shears.*
> *Ore distribution is strongly controlled by rock type. Massive replacements are mainly restricted to the pyroclastic rocks (frailesca-type) and lavas, while fracture infllings can be observed in both the metasedimentary (metapelites and quartzites) and metavolcanic rocks. Massive cinnabar replacements (high-grade ore-zones with up to 20% Hg) can be found in the frailesca rock and lavas where it occurs as irregular bodies.*
>
> *Higueras et al. (1999)*

Las Cuevas es el yacimiento más importante de este grupo, si bien sus dimensiones y producción son modestas comparadas con las de Almadén e incluso con las de El Entredicho. Hoy en día toda la minería del mercurio ha cesado en el yacimiento. Se trata de una mineralización constituida por unos macizos mineralizados columnares encajados en rocas de distintas litologías, si bien su mayor desarrollo se alcanza en las rocas magmáticas. La mineralización aparece como una red compleja, anastomosada de filones de escasa continuidad, y que en ocasiones favorecen el desarrollo a partir de ellos de una diseminación por reemplazamiento de las rocas de caja, sobre todo cuando éstas son de naturaleza magmática.



La mina de Las Cuevas. 1. Antigua escombrera de la mina que fue más tarde restaurada. 2. Sitio donde se acumulaba el mineral extraido de la mina. 3. Area que sufrió un colapso en 1997. 4. Antiguas oficinas y nave de mantenimiento de vehículos. 5. Acceso por rampa a la mina. 6. Explotación ganadera. 7a. Encinar (Quercus rotundifolia). 7b. Paisaje tipo dehesa.

Desde el punto de vista mineralógico y con notable importancia ambiental, Las Cuevas presentaba una variabilidad algo superior a la de los yacimientos del tipo

Almadén, pero únicamente por la presencia de pirita que era relativamente abundante. También se aprecia una mayor abundancia de mercurio metálico frente a la de los yacimientos del tipo Almadén.

5.1.2 Procesos de meteorización que han afectado a los yacimientos del distrito

La meteorización de un yacimiento se produce desde el momento en que queda sometido a la acción de los agentes externos (aire, agua, oxígeno disuelto en esta última) por erosión de los materiales suprayacentes. Estos procesos se ven facilitados porque el agua de lluvia alcanza una cierta acidez producto de la reacción con el CO_2 atmosférico que induce la formación de ácido carbónico. Este proceso lleva a la destrucción de los silicatos, aquí representados como ejemplo por el olivino, mineral presente en basaltos como los que se encuentran en la secuencia estratigráfica de Almadén:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

$$H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$$

$$(Fe_{0.5}Mg_{0.5})_2SiO_4 + 4H^+ \rightarrow Fe^{2+} + Mg^{2+} + SiO_2 + 2H_2O$$

Por su parte, la explotación minera de los yacimientos aumenta el grado de exposición de los productos mineros a los agentes atmosféricos, tanto en las labores de superficie (lo más evidente) como en las subterráneas. En estas últimas penetra aire que se renueva constantemente, y hay movimiento de agua que igualmente se renueva de forma continua al infiltrarse hacia las labores y ser bombeada a superficie. Los siguientes son los procesos más comunes en Almadén.

1. Alteración de la pirita. Este mineral es un componente minoritario de los yacimientos del tipo Almadén, si bien en algunos del tipo Las Cuevas, llega a ser abundante. La pirita es el primer sulfuro en meteorizarse a través de su oxidación e hidrólisis, que puede ser acelerada y potenciada a través de la actividad bacteriana:

$$4FeS_2 + 10H_2O + 15O_2 \rightarrow 4FeO(OH) + 16H^+ + 8SO_4^{2-}$$

Este proceso de hidrólisis es además, el causante de la formación del Drenaje Ácido de Mina o acidificación y carga por sales y metales pesados

de las aguas en contacto en yacimientos de sulfuros. El proceso resulta evidente en la escorrentía superficial de El Entredicho, con aguas cargadas de oxihidróxidos de hierro coloidales como se observa en la siguiente figura.



Formación de drenaje rico en oxihidróxidos de hierro en El Entredicho, cerca de una escombrera.

Sin embargo, el pH de las aguas afectadas permanece próximo a neutralidad debido a la acción tamponadora (*buffering*) de los carbonatos presentes como minerales de ganga en los yacimientos del distrito.

2. Alteración del cinabrio. El cinabrio es un mineral físico-químicamente estable, cuya alteración requiere condiciones más extremas que las existentes en el medio local de los yacimientos de Almadén. Hasta la implantación en 1957 de los hornos de calcinación "Pacific", en un recinto totalmente cerrado y controlado (Cerco de San Teodoro; Almadén), la metalurgia del cinabrio de Almadén se llevó a cabo en condiciones de cierta precariedad, lo que favoreció la presencia de productos mineralógicos diversos en distintos puntos del Distrito. De esta forma, a pesar de la ausencia de drenaje ácido y de la estabilidad de la mena principal del elemento, en diversos puntos se ha podido verificar la formación de compuestos supergénicos de mercurio. Higueras et al. (2004a) describen la presencia del sulfato de mercurio schuetteita ($Hg_3(SO_4)O_2$), mientras que Gray et al. (2004) y Esbrí et al. (2010) citan la presencia de otras sales del elemento: calomel (Hg_2Cl_2), corderoita ($Hg_3S_2Cl_2$), montroydita (HgO), kleinita ($Hg_2N(Cl,SO_4)\bullet n(H_2O)$), terlinguaita ($Hg_2ClO$) y gianellaita ($Hg_4(SO_4)N_2$). A partir de datos de observación directa, resulta evidente que la schuetteita se forma en ambiente aéreo, más que probablemente como consecuencia de condensación de mercurio gaseoso, en una reacción catalizada por la luz solar, como pone de manifiesto la presencia del mineral en las superficies de cantos sin mineralización, o incluso en paredes de

edificaciones expuestas al sol. El resto de fases aparecen en muestras de suelos (en las que no se detecta schuetteita) y se han encontrado exclusivamente sobre residuos de calcinación, lo que hace pensar que se forman en este ambiente menos oxigenado como consecuencia de actividad bacteriana, o al menos catalizada por ésta. La schuetteita es un sulfato bastante inmóvil, lo que limita la dispersión del elemento, pero el resto de compuestos son relativamente solubles, y podrían constituir un substrato o materia prima en la formación del compuesto más tóxico del elemento, el metilmercurio $[CH_3Hg]^+$, cuyas concentraciones medidas en Almadén alcanzan los valores máximos precisamente en suelos formados sobre este tipo de residuos (Gray et al., 2004).



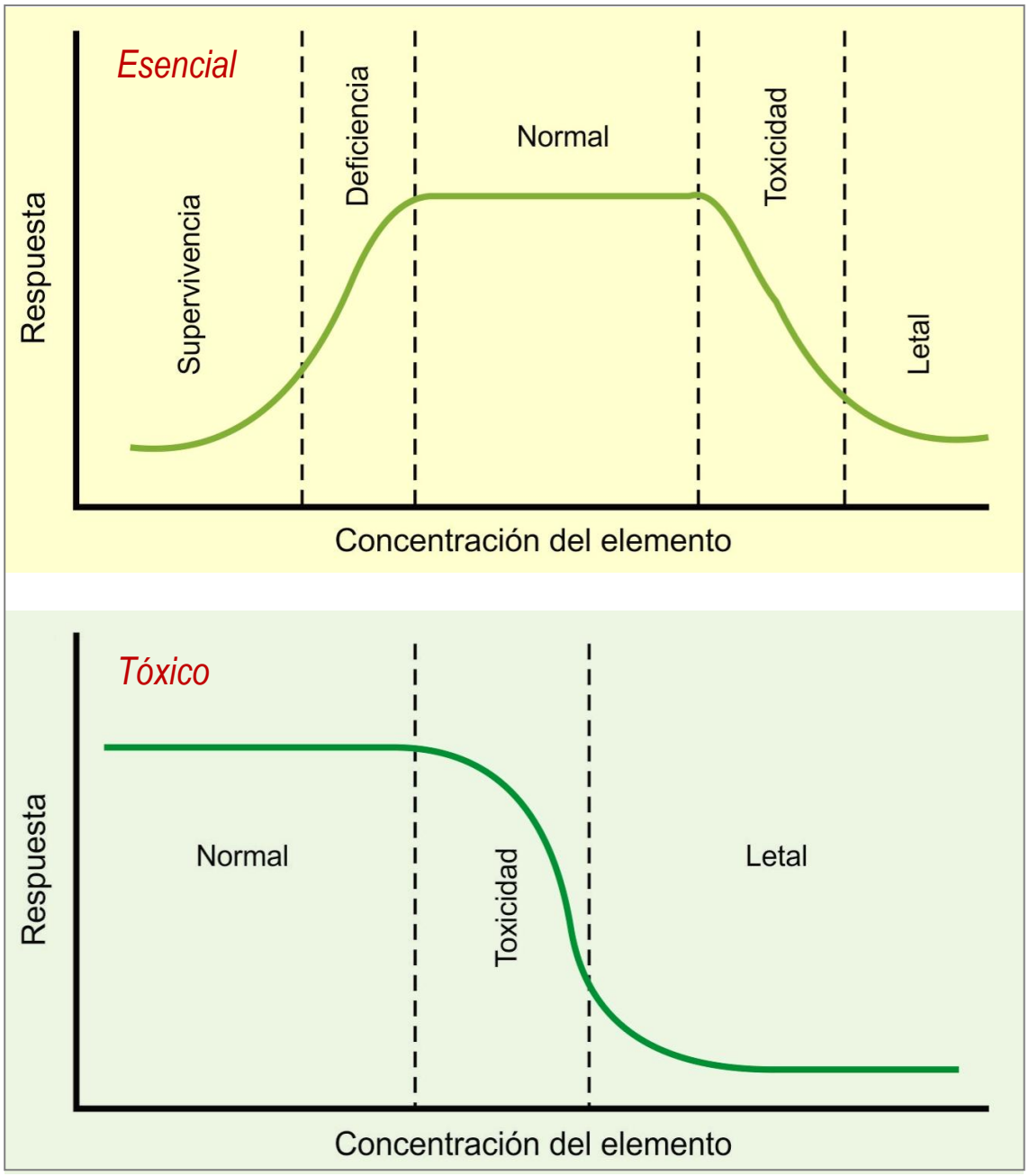
Schuetteita (flecha) sobre ladrillos refractarios en los antiguos hornos de calcinación de mercurio del Cerco de Almadenejos.

5.1.3. Problemática ambiental del mercurio

También las actividades relacionadas como la metalurgia facilitan la dispersión de los contaminantes mineros, en forma de polvo cargado de partículas de mineralización, mercurio gas, mercurio reactivo, así como por las emisiones que pueden producirse de los productos y subproductos formados durante esta actividad (hollines, cenizas, etc.). De esta manera hablamos de temas muy complejos que requieren un enfoque global.

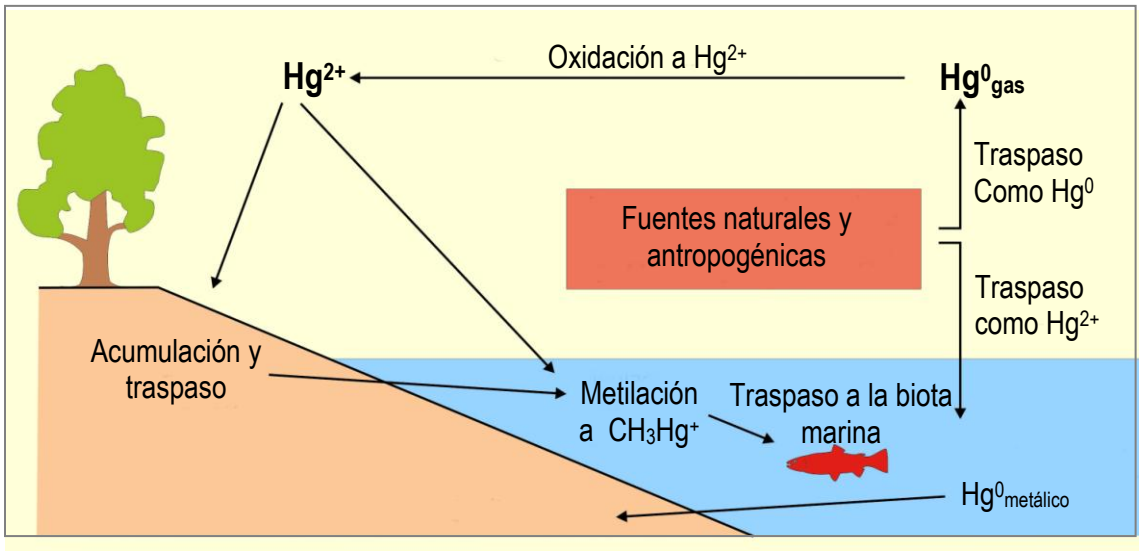
El mercurio es un elemento de alta toxicidad, si bien, para ser más correctos, deberíamos decir que es un elemento que tiene compuestos o especies que son tóxicas en bajas concentraciones. Sobre el mercurio podemos decir que se trata de un metal tóxico, es decir, que no tiene un papel biológico específico, lo que hace que su incorporación al organismo no resulte necesaria, y que a partir de ciertas dosis produzca efectos adversos sobre nuestra salud. Recordemos que la principal

diferencia entre un elemento tóxico y uno esencial es que el segundo produce efectos adversos sobre la salud también por omisión:



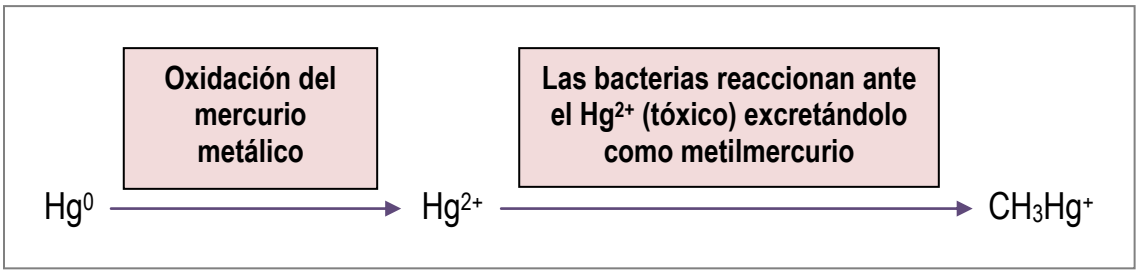
Diferentes comportamientos toxicológicos de los elementos químicos y compuestos.

En cualquier caso, el mercurio comparte con muchos otros elementos la consideración de tóxico, pero ¿qué es lo que hace que sea considerado como un "contaminante global"? Para entenderlo tenemos que referirnos al ciclo geoquímico del mercurio:



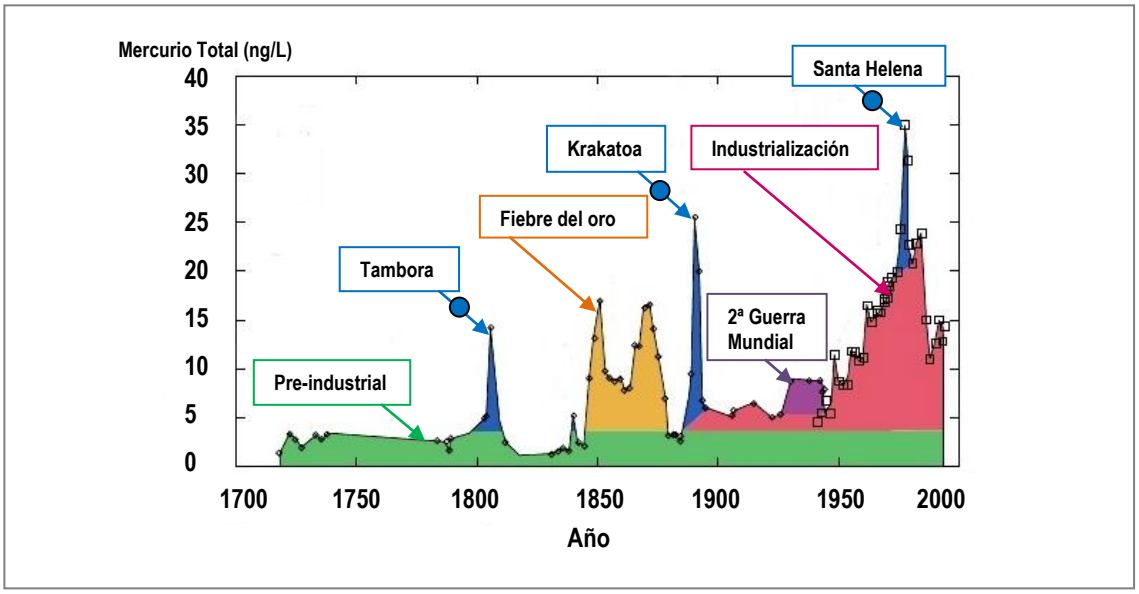
Ciclo del mercurio.

Podemos resumir la metilación del mercurio de la siguiente manera simple para el sistema agua — mercurio metálico — mercurio oxidado — metilmercurio — bacterias — materia orgánica (Hamdy y Noyes, 1975):



En la figura superior sobre el ciclo del mercurio podemos observar como este elemento, procedente tanto de las emisiones naturales (actividad volcánica, emisiones por suelos, emisiones durante incendios forestales) como antrópicas (minería, metalurgia, plantas clorocáusticas, combustión de carbón, etc.), pasa a la atmósfera en forma de vapor elemental (Hg^0_{gas}), donde tiene un tiempo de residencia de 0,5 -1,7 años (Holmes et al., 2006). Este vapor de mercurio no es problemático mientras esté diluido, pero parte del mismo sufre transformaciones oxidativas, como consecuencia de la reacción con ozono y otros compuestos atmosféricos, transformándose en el ión Hg^{2+}. La acción de los procesos de deposición seca (ligada a partículas de polvo atmosférico) y deposición húmeda (ligada a la acción de la lluvia) trae de nuevo el mercurio, y en particular el ión Hg^{2+} a la biosfera, donde es susceptible de transformaciones variadas como la metilación. El ión Hg^{2+} puede combinarse con el azufre del suelo para dar origen a cinabrio o metacinabrio (polimorfo del cinabrio) que se forma como consecuencia de actividad biológica (Baldi, 1993), o puede transformarse en complejos orgánicos con grupos metil, que dan lugar al metilmercurio CH_3Hg^+, complejo que le confiere al mercurio una elevadísima toxicidad.

Por otra parte, la presencia de este compuesto sigue sin ser un problema *per se*, puesto que salvo en contadas ocasiones no llega a ser lo suficientemente abundante en los medios en los que se forma como para representar un problema real.



Fuentes naturales de mercurio. Deposición de mercurio atmosférico en los hielos del Glaciar Fremont (Wyoming), desde fuentes naturales (volcanes: flecha y círculo) y antrópicas, entre los años 1700 y 2000 (adaptada de Krabbenhoft y Schuster, 2002).

Los peces incorporan metilmercurio a su organismo, concentrándolo varios órdenes de magnitud. A su vez, en la cadena trófica acuática se produce un incremento progresivo del contenido de mercurio conforme se asciende en esta. Este último proceso se denomina "biomagnificación" y es responsable de la existencia de peces con contenidos elevados de mercurio.

La ingesta de pescado con altos contenidos en metilmercurio representa un factor de riesgo para el hombre, como ocurrió en la Bahía de Minamata (Japón) en los años 1950's (Kurland et al., 1960). Vertidos industriales de metilmercurio a la bahía hicieron que la población de la zona desarrollase por ingesta del pescado contaminado el denominado "Síndrome (o enfermedad) de Minamata", de gravísimas consecuencias para la población de la zona y su descendencia debido a los efectos placentarios del tóxico.

En este sentido, Sunderland et al. (2009) resaltan que los peces capturados en el Océano Pacífico constituyen la mayor fuente de metilmercurio para el hombre. Sin embargo, como señalan Oyarzún y Oyarzun (2011), no se observa que incidentes de salud pública con metilmercurio (como el de Minamata) sean cosa común, ni tan siquiera de forma anecdótica entre las poblaciones humanas ribereñas. Al respecto, recordemos que no se trata tan solo de la exposición a un compuesto tóxico, sino que son las concentraciones del mismo (sumadas al tiempo de

exposición) las que pueden hacer la diferencia. Así, y recurriendo a un lenguaje más "de la calle", se puede señalar que sobre la peligrosidad del mercurio hay que decir: *ni tanto ni tan poco*.

Sobre esta base, la problemática global del mercurio tiene grandes afinidades con la de los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Tanto el mercurio como los GEI están ahí de forma natural desde la formación del planeta, y evidentemente sus concentraciones han variado mucho a lo largo de la historia global de la Tierra.

El problema radica en que un aumento de las concentraciones de los GEI en la atmósfera puede activar problemas muy serios, como son un cambio climático excesivamente rápido. Las consecuencias serían de todo tipo, desde las biológicas a las económicas. Entre estas, y volviendo a nuestro tema central, está el que un aumento de las temperaturas globales lleve a un incremento en la formación de mercurio gaseoso y por lo tanto a un desequilibrio en el ciclo del mercurio.

> ***Minamata disease**, sometimes referred to as Chisso-Minamata disease, is a neurological syndrome caused by severe mercury poisoning. Symptoms include ataxia, numbness in the hands and feet, general muscle weakness, narrowing of the field of vision and damage to hearing and speech. In extreme cases, insanity, paralysis, coma and death follow within weeks of the onset of symptoms. A congenital form of the disease can also affect fetuses in the womb.*
>
> *Minamata disease was first discovered in Minamata city in Kumamoto prefecture, Japan in 1956. It was caused by the release of methylmercury in the industrial wastewater from the Chisso Corporation's chemical factory, which continued from 1932 to 1968. This highly toxic chemical bioaccumulated in shellfish and fish in Minamata Bay and the Shiranui Sea, which when eaten by the local populace resulted in mercury poisoning. While cat, dog, pig, and human deaths continued over more than 30 years, the government and company did little to prevent the pollution.*
>
> *As of March 2001, 2,265 victims had been officially recognised (1,784 of whom had died) and over 10,000 had received financial compensation from Chisso. By 2004, Chisso Corporation had paid $86 million in compensation, and in the same year was ordered to clean up its contamination. On March 29, 2010, a settlement was reached to compensate as-yet uncertified victims.*
>
> *Wikipedia (2011a)*

Si regresamos al caso de Almadén, la meteorización de los yacimientos de cinabrio da lugar al desarrollo de dos procesos que suponen un riesgo ambiental. Por un lado está la liberación de mercurio gaseoso a la atmósfera, y por otro la formación de sales relativamente solubles que aparecen como precursoras de la formación de metilmercurio. A continuación se reseñan los resultados más relevantes del análisis de estos procesos.

5.1.4 Problemas ambientales en el distrito de Almadén

La dispersión del mercurio en el entorno de los yacimientos de mercurio y cercos metalúrgicos de Almadén es el resultado del desarrollo de los procesos de alteración supergénica (*naturales*) e industriales. Los productos son:

- Partículas sólidas conteniendo mineralización o productos asociados, que son dispersadas por el viento y por las aguas superficiales.

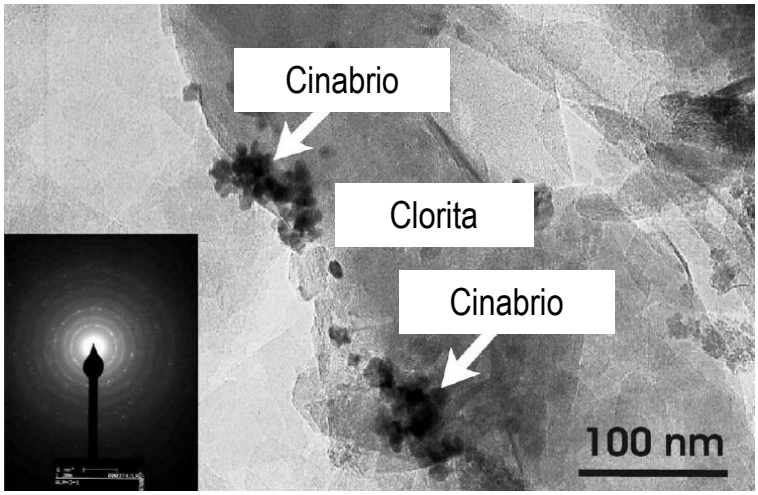
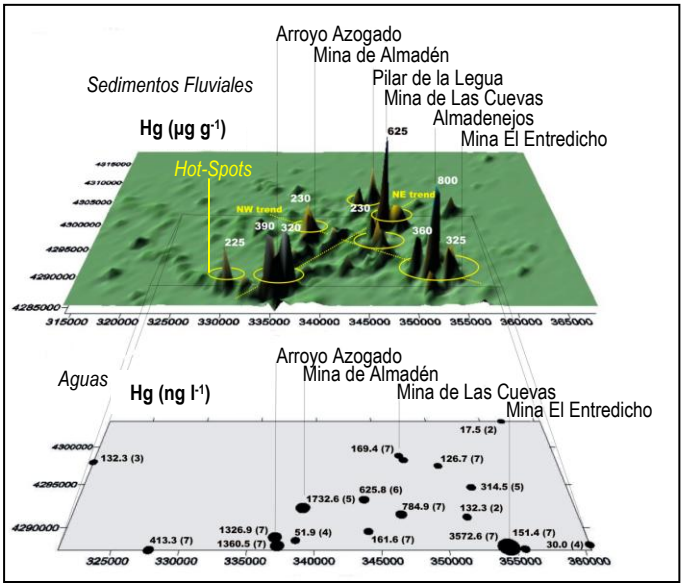


Imagen TEM de la muestra GAP 3.1 (5037 µg g^{-1} Hg) donde se observa la presencia de diminutas partículas de cinabrio sobre la superficie de clorita. Además se muestra el patrón de difracción de electrones de cinabrio (ver recuadro). Adaptada de Higueras et al. (2003).

- Iones y complejos de mercurio disueltos en las aguas superficiales o fijados en sedimentos.

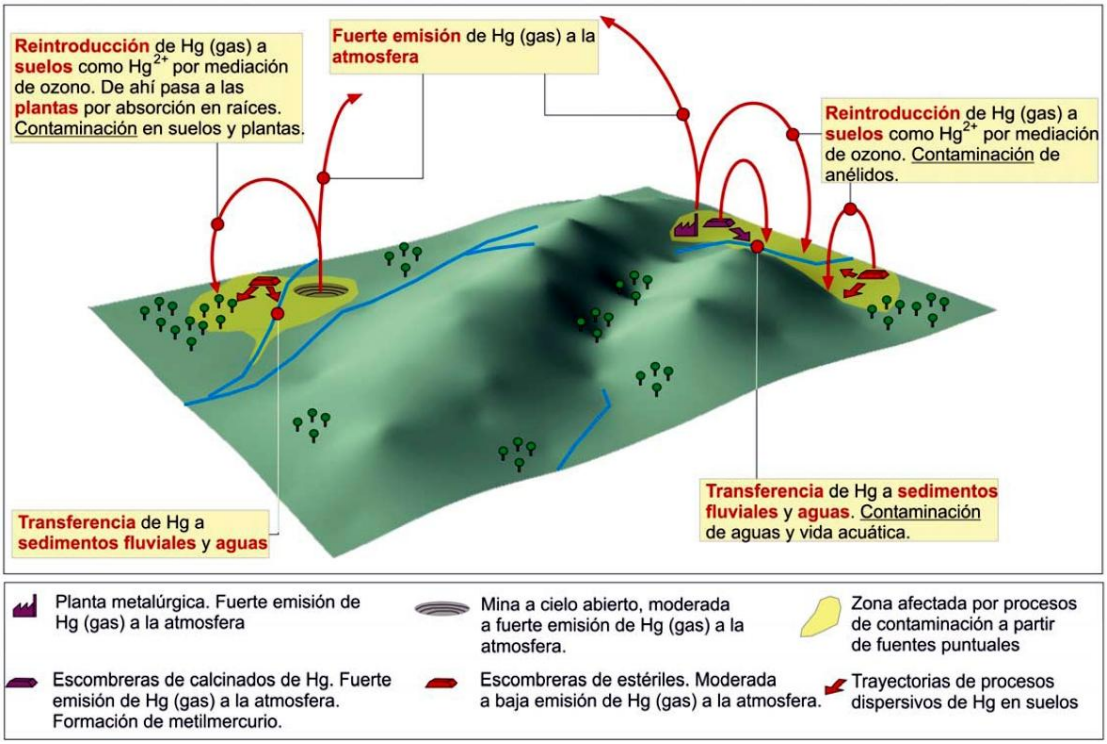


Mercurio en sedimentos fluviales y aguas en el distrito de Almadén, mostrando las zonas zonas más fuertemente contaminadas (hot-spots). Adaptada de Higueras et al. (2006).

- Vapores del metal que se emiten a la atmósfera.

Las concentraciones de mercurio afectan de una manera u otra a todos los compartimentos ambientales del área. La atmósfera, aguas, sedimentos de arroyos y suelos; la vegetación que capta mercurio de los suelos que contienen el

elemento y los animales, tanto herbívoros que comen plantas que han captado mercurio, como carnívoros, que comen animales herbívoros afectados; los organismos acuáticos que captan el mercurio del agua de vegetales acuáticos, de los sedimentos de fondo y lo bioacumulan en sus organismos en forma de metilmercurio.



Relaciones yacimientos – minería – atmósfera – ríos para el mercurio en un entorno minero complejo como era el de Almadén en su época productiva.

Por su parte el hombre queda expuesto a estos contaminantes de forma directa, por la posibilidad de respirar los vapores, o beber aguas contaminadas, y de forma indirecta, a través de la cadena trófica, al consumir alimentos contaminados. En definitiva, se produce una afectación generalizada del medio ambiente local, con una extensión e intensidad que es función de muy diversos parámetros, tanto propios de las mineralizaciones (movilidad del elemento, capacidad de formar Drenaje Ácido de Mina) como externos (topografía, climatología, tipo de vegetación, etc.).

… A first approach toward the identification of the sources of atmospheric mercury in the Almadén district leads to the metallurgical (roaster) and mining complex of Almadén town, where Ferrara et al. (1998) measured up to 20,000 ng Hg m^{-3}. The main identified potential sources were the metallurgical plant, the mine ventilation system, the dumps of roasted cinnabar, droplets of native mercury covering the ground in the complex, and the particulate matter carried away by the wind and vehicular activity …

… As shown by our measurements the roster generates extremely high Hg concentrations. For example, a static continuous measurement (67 min) at the entrance of the metallurgical site (250 m away from the chimney) showed a mean concentration of 14,236 ng Hg m^{-3} …

Higueras et al. (2006)

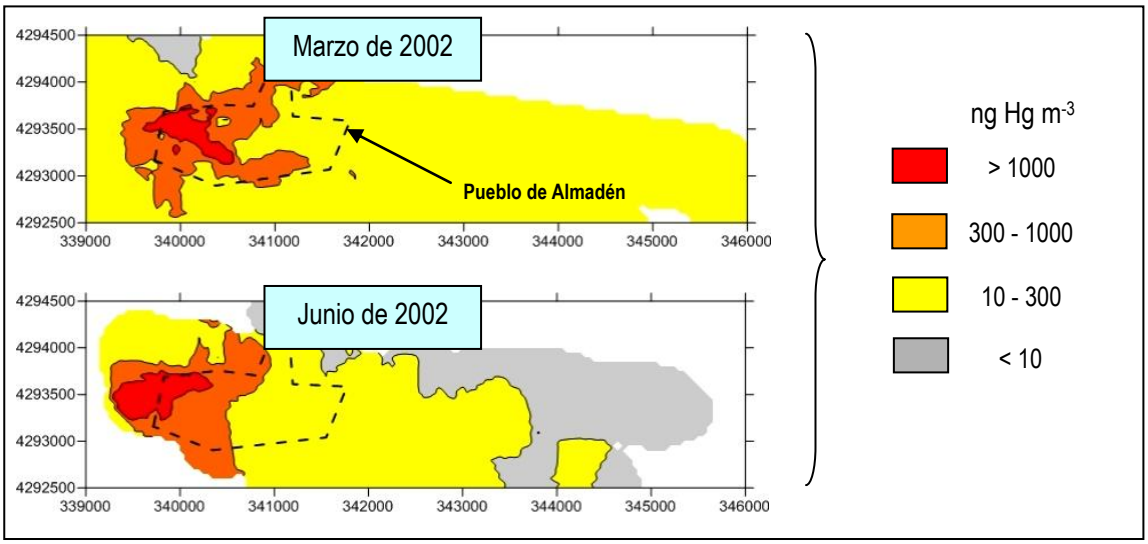
Se describen a continuación los principales datos recabados en los últimos años por nuestro equipo de investigación y otros, en los distintos compartimentos ambientales del Distrito minero de Almadén.

Atmósfera Las altas concentraciones de mercurio en la atmósfera de Almadén se relacionaban con dos grandes procesos: a) emisiones directas desde la metalurgia, y b) emisiones indirectas desde los suelos, escombreras e instalaciones mineras en general. Las emisiones directas cesaron en el año 2003, cuando cesó la actividad metalúrgica de los hornos Pacific. Las indirectas también han descendido notablemente al cesar la actividad minera, y en particular al llevarse a cabo la restauración de las escombreras de las minas de Las Cuevas, El Entredicho, y sobre todo, de la mina de Almadén.



Metalurgia de Almadén, hornos Pacific (imagen[2]). Principal fuente de emisión de mercurio gas y gases de azufre oxidado mientras operaba. Como señalan Higueras et al. (2006), los niveles de Hg_{gas} eran elevadísimos cerca de la metalurgia, superándose por mucho (más de 10 veces) el límite máximo fijado por la Organización Mundial de la Salud para la exposición crónica a este contaminante, el cual está fijado en 1000 ng Hg m^{-3} (WHO, 2000).

Como se puede apreciar en la figura siguiente, en 2002 había diferencias notables en el área urbana de Almadén. Por un lado la zona del casco urbano afectada se redujo de Marzo a Junio (y de Este a Oeste). Este hecho se relacionó con el cese de la emisión directa desde la metalurgia en la época en que se realizaron las mediciones (Higueras et al., 2006) y afectó positivamente a parte del entorno urbano de Almadén. Por otra parte, y a pesar de esto, las emisiones continuaron, lo cual demuestra que la metalurgia no era la única fuente de emisiones de Hg_{gas} en la zona.

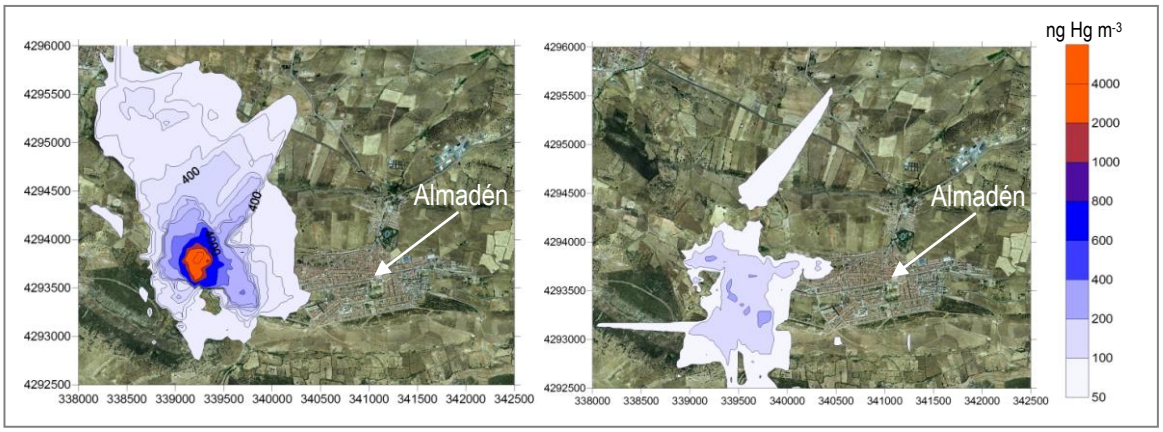


Isocontenidos de mercurio en la atmósfera de las inmediaciones de Almadén, en 2002 cuando todavía operaba la metalurgia. La línea discontinua corresponde al límite del casco urbano de Almadén. Aunque durante las mediciones de Junio la metalurgia estaba semi-parada (cese momentáneo), se seguían observando fuertes emisiones en el sector occidental (Higueras et al., 2006), hecho atribuible a la gran escombrera de calcinados que se emplazaba junto al complejo minero-metalúrgico (ver imagen de abajo). Mediciones con un LUMEX RA-915+.



Instalaciones minero-metalúrgicas de la mina de Almadén. A la izquierda, la escombrera de calcinados antes de las labores de restauración; a la derecha, durante los trabajos de rahabilitación. Al fondo, el pueblo de Almadén (imágenes[3,4]).

En las fotos del complejo minero-metalúrgico podemos apreciar que existe allí una gran escombrera de residuos derivados del proceso de calcinación en los hornos Pacific, la cual *per se* presentaba altísimos valores de emisión. En las siguientes imágenes se aprecia el valor de las emisiones cuando la escombrera estaba ya en proceso de restauración y con posterioridad a esos trabajos. La escombrera fue primero alisada, luego cubierta con geotextiles y al final vegetada.



Valores de Hg_{gas} medidos durante la restauración de la escombrera de Almadén (izquierda) y tras esta restauración (derecha). Mediciones con un LUMEX RA-915+.

Muestreo	n	Media	Max
Antes (Junio de 2002)	1,393	302	6892
Durante (11/05/06)	4,286	456	> 25000
Después (04/10/07)	4,059	42	741

Concentraciones de mercurio atmosférico medidas en el entorno urbano de Almadén antes, durante y después de la restauración de la escombrera principal. Max: valor máximo; n: numero de medidas. Valores en ng Hg m^{-3}.

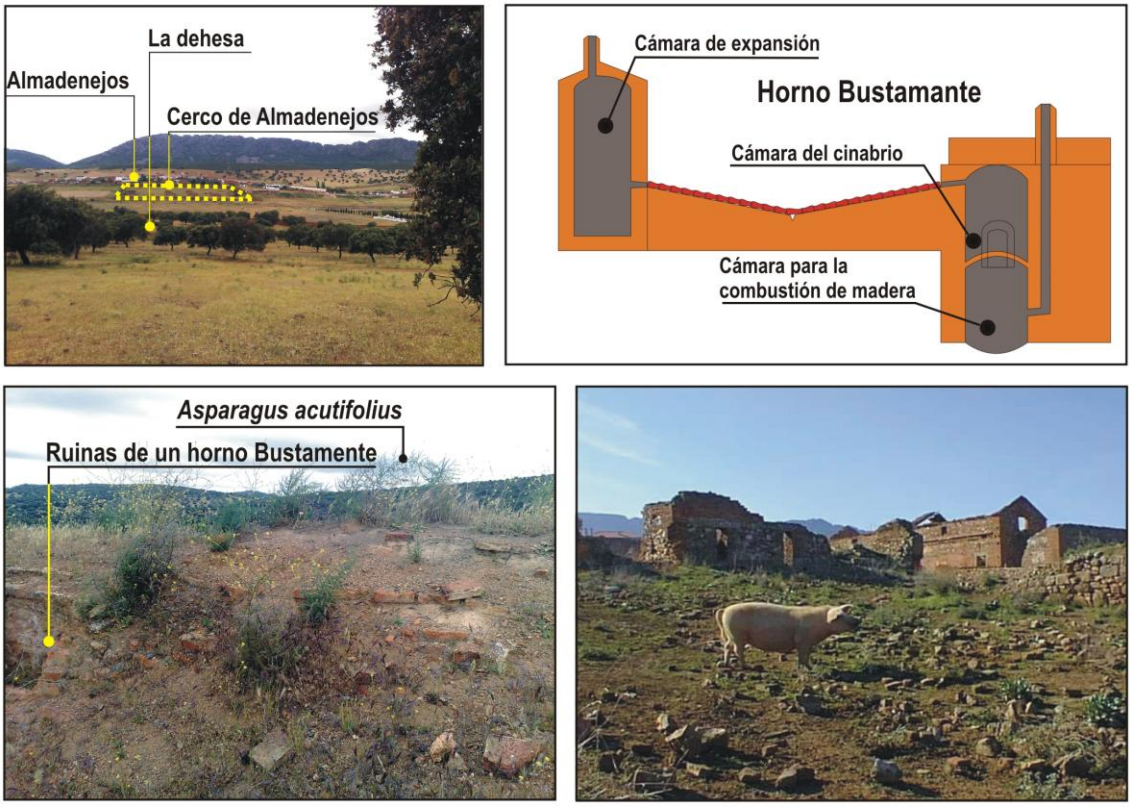
Que duda cabe que los altos valores de emisión asociados a la escombrera de Almadén han disminuido substancialmente, no obstante no debemos perder de vista dos hechos relevantes:

1. Si sellamos una fuente de emisión de mercurio gaseoso con geotextiles y tierra vegetal impidiremos (en gran medida) que el mercurio siga emanando hacia la atmósfera.
2. Sin embargo, cualquier superficie geotextil tiene una vida útil limitada en el tiempo, por lo cual la opción de ajardinamiento debe ser tomada por lo que es, una solución transitoria para un problema importante. Con respecto a la tierra que se puede decir, si las lluvias torrenciales arrastran suelos consolidados, imaginemos lo que ocurre con uno artificial y de escaso espesor.

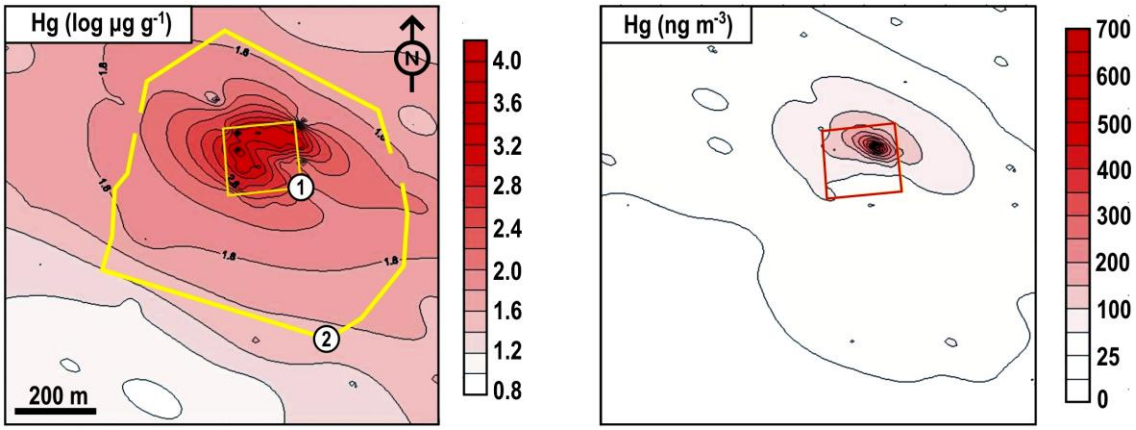
De hecho, la solución más adecuada para estos casos ha sido ya propuesta para el Cerco de Almadenejos (otro sitio en el distrito con fuertes emisiones) por Martínez Coronado et al. (2011) y consiste en el sellado permanente de los materiales con una barrera impermeable, por ejemplo, hormigón. Este procedimiento tiene muchas ventajas (Evanko y Dzombak, 1997): 1. Impide la infiltración del agua y la contaminación del agua subterránea. 2. Evita las emisiones de gases desde el sitio. 3. Elimina los riesgos asociados con el contacto con la piel y/o la ingestión e inhalación involuntaria de particulas diminutas de suelos contaminados.

Otra fuente difusa importante de emisión de Hg_{gas} en el distrito de Almadén es el llamado Cerco de Almadenejos (CDA), un antiguo sitio metalúrgico localizado al lado del pueblo del mismo nombre, y adyacente a la mina Nueva Concepción. El Cerco funcionó entre 1794 y 1861, y fue construido para la calcinación de cinabrio de las minas de Almadén. Un estudio de detalle de los suelos del recinto muestra una concentración media muy alta de 4220 μg Hg g^{-1}. A su vez, estos suelos altamente contaminados inducen fuertes emisiones de Hg_{gas} con concentraciones de hasta 970 ng Hg m^{-3} (Martínez Coronado et al., 2011). En el verano estas concentraciones suben mucho más.

> *The CDA is a highly polluted site with high to extremely high Hg concentrations in soils, air and plants. Different from other sectors of the Almadén district, pollution in the CDA can be regarded as essentially anthropic. Hundreds of years of primitive Hg metallurgical practices have left a legacy of highly contaminated soils. The environmental hazards induced by such contamination do not end at the walls of the CDA, because as shown above, high concentrations of Hg are persistent and extend well beyond the precinct. But it is not only the soils, the Hg(g) anomaly also extend beyond the precinct. In this respect, Hg concentrations are currently being monitored to assess the real environmental danger posed by these emissions.*
>
> *Martínez Coronado et al. (2011)*



El Cerco de Almadenejos. Arriba izquierda, principales elementos constitutivos del lugar; a la derecha, diagrama de los viejos hornos Bustamente que se usaban en aquella época; abajo izquierda, ruinas de un antiguo horno y el espárrago silvestre comestible "triguero" (Asparagus acutifolius). A la derecha, ruinas y cerdos que viven el el sitio. Martínez Coronado et al. (2011).



Distribución de Hg en suelos y aire en Almadenejos y el Cerco. A la izquierda, suelos, la escala es log x; a la derecha, valores en aire, mediciones con un LUMEX RA-915+. 1: Muro del antiguo recinto metalúrgico de Almadenejos; 2: Muralla exterior. Adaptada de Martínez Coronado et al. (2011).

En el resto del distrito se pueden destacar otros focos activos de cierta importancia, como el entorno de la mina de El Entredicho, zona en la que, por otra parte, se han llevado a cabo acciones que posiblemente han supuesto una disminución considerable de las emisiones (aunque no han sido verificadas), como el llenado de la corta con agua del río Valdeazogues, o la restauración parcial de escombreras. En todo caso, la población más cercana, Almadenejos, se sitúa a unos 3 km de la corta (*rajo*), lo que implica una escasa influencia de las emisiones en el pueblo, mucho más afectado como indicábamos anteriormente por la antigua instalación metalúrgica (CDA).

> *… For example, while there is a widespread public concern regarding the presence of methylmercury (CH_3Hg^+) in seafood, the public little realizes the potential health risks derived from the presence of gaseous mercury. The World Health Organization (WHO, 2000) indicates that concentrations of Hg in air in the range of 15,000−30,000 ng m^{-3} may have effects on human physiology (tremors, renal tubular effects, change in plasma enzymes, and others). However, the same organization recognizes that these figures are rough estimates and that it seems appropriate to use an uncertainty factor of 20; thus, an estimated guideline for mercury concentration in air would be 1 µg m^{-3} (1000 ng m^{-3}) (WHO, 2000). The US EPA (2007) (Region 5) recommends the following: if Hg (gas) concentrations are between 1–10 µg m^{-3} (1000–10,000 ng m^{-3}), relocation of residents should be scheduled as soon as possible. For concentrations above 10 µg m^{-3} (> 10,000 ng m^{-3}), residents should be relocated immediately…*
>
> *Oyarzun et al. (2007a)*

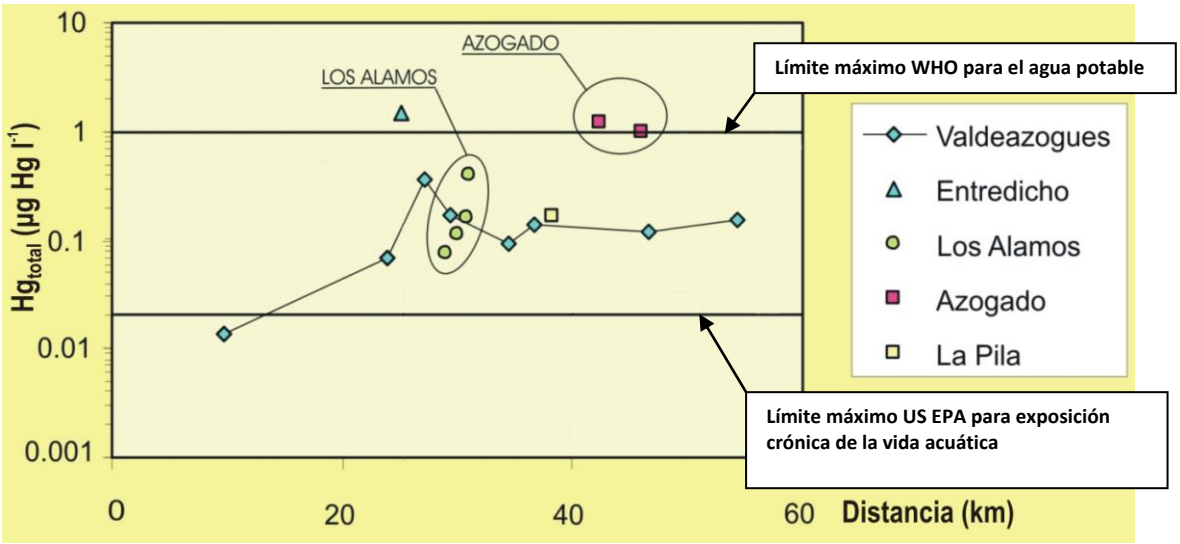
No se puede evitar el considerar la exposición histórica de los habitantes de las localidades mencionadas (Almadén y Almadenejos) al vapor de mercurio. Si la planta metalurgica de Almadén con solo un horno funcionando en Junio de 2002 generaba concentraciones en el casco urbano de 3-10 veces el valor máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (1000 ng Hg m^{-3}) (WHO, 2000), podría esperarse que durante los periodos de actividad de los tres hornos estos valores fuesen muy superiores a los medidos, acercándose a los niveles de exposición máximos recomendados como es el valor NIOSH REL (10-hr TWA) de 50.000 ng Hg m^{-3} (NIOSH, 2006).

Aguas La presencia de mercurio en las aguas del área ha sido investigada por Gray et al. (2004), Berzas Nevado et al. (2003, 2009), e Higueras et al. (2006). Nuestro equipo también dispone de datos hasta ahora inéditos, correspondientes a una campaña de muestreo y análisis de contenidos en el elemento llevada a cabo de Febrero de 2004 a Marzo de 2006. Se realizaron análisis de mercurio total, de mercurio soluble, y de metilmercurio, mediante técnicas diversas y sobre muestras de aguas superficiales y subterráneas (manantiales). Los resultados se sintetizan en la siguiente tabla:

	Aguas Superficiales (total)	Aguas Superficiales (soluble)	Aguas subterráneas	Agua Potable
Promedio	736	100	70	14
Mínimo	4	0	4	1
Máximo	20600	1510	153	50

Contenidos de mercurio en aguas del Distrito Minero de Almadén. Mercurio total y soluble. Valores, en ng Hg l^{-1}.

Los valores para mercurio total ponen de manifiesto que en la zona existen aguas con contenidos en mercurio muy variables, destacando el río Valdeazogues que atraviesa toda la zona y los arroyos Azogado y de la Pila, que son afluentes del Valdeazogues. Estos ríos que drenan el casco urbano de Almadén y las escombreras de la mina son los que presentan los máximos contenidos en este metal.

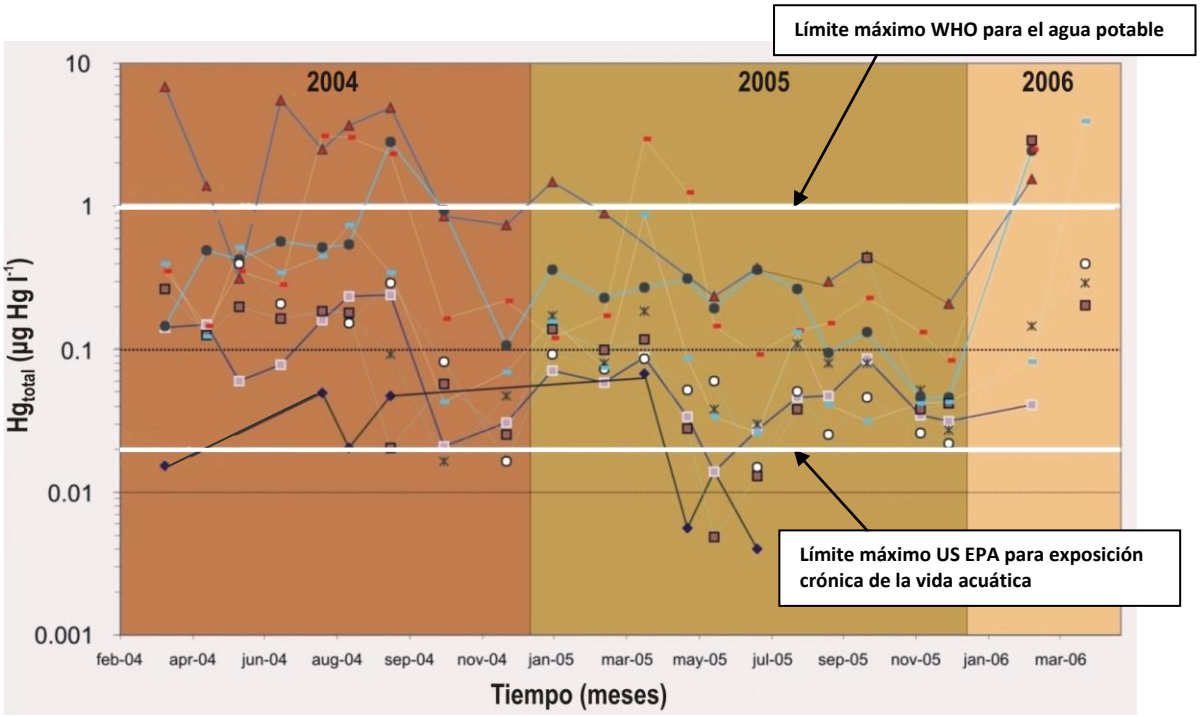


Contenidos medios en mercurio total en el río Valdeazogues. También se muestran los contenidos en la corta de El Entredicho, el Arroyo de Los Álamos (que corta la mina de Las Cuevas), y en el arroyo Azogado, que drena el sector Oeste de Almadén y por tanto, las escombreras mineras, y el recinto minero-metalúrgico en general.

En la figura de arriba se aprecia como a lo largo del Valdeazogues los valores de concentración de mercurio se mantienen por debajo del valor máximo recomendado por la OMS (WHO) para aguas potables (1 µg Hg l^{-1}) (WHO, 1971), mientras que en casos particulares como el Arroyo Azogado este valor se supera.

También se muestra como en todo el distrito las aguas presentan concentraciones por encima del valor máximo recomendado por la agencia americana de protección ambiental US EPA para exposición crónica de la vida acuática, límite fijado en 12 ng Hg l^{-1} (US EPA, 1992).

Por su parte, también existen variaciones estacionales significativas (como sería de esperar) a lo largo de ríos como el Valdeazogues. No se pueden establecer pautas claras en la distribución estacional del elemento en las aguas, aunque sí es posible observar que se producen superaciones del nivel de referencia para aguas potables de 1 µg Hg l^{-1} en estaciones concretas.



Concentraciones de mercurio en aguas del río Valdeazogues a lo largo de su recorrido por el distrito en las diversas estaciones de medida establecidas a lo largo del periodo indicado en la abscisa.



Dos vistas del Río Valdeazogues (imágenes[5,6])

Las concentraciones de mercurio son sistemáticamente muy bajas en las aguas subterráneas procedentes de diversos manantiales de la zona, incluido uno situado en el entorno inmediato de una antigua pequeña mina (Pilar de la Legua). Esto parece ser consecuencia de una escasa transmisividad de los acuíferos locales y de la aridez de la zona, que condiciona una distribución espacial muy limitada de los mismos.

El agua potable para las poblaciones de la zona proceden del Embalse de La Rivera, situado a unos 10 km al NE de la mina situada más al norte del Distrito (Las Cuevas). Probablemente por esta razón, los contenidos de mercurio total medidos en este embalse se mantienen entre 1 y 50 ng l^{-1}, siempre muy por debajo del valor de referencia de la OMS (WHO) antes mencionado de 1 µg Hg l^{-1}.

En lo que se refiere a mercurio soluble, sus concentraciones suponen porcentajes del orden del 23% del mercurio total medido, poniendo de manifiesto que la mayor parte del mercurio que se encuentra en medio acuoso lo hace en forma de partículas en suspensión, muy probablemente como cinabrio adherido a partículas o geles arcillosos, limitando la problemática que representaría su presencia como sal soluble, y en particular como sales del radical metilmercurio.

Las concentraciones de metilmercurio determinadas en las aguas superficiales de la zona han sido publicadas por Gray et al. (2004) y por Berzas Nevado et al. (2009) y se muestran en la siguiente tabla:

Drinking Water Contaminants-Mercury

… The MCLG for mercury has been set at 2 parts per billion (ppb) because EPA believes this level of protection would not cause any of the potential health problems described below.

Based on this MCLG, EPA has set an enforceable standard called a Maximum Contaminant Level (MCL). MCLs are set as close to the MCLGs as possible, considering the ability of public water systems to detect and remove contaminants using suitable treatment technologies.

The MCL has also been set at 2 ppb because EPA believes, given present technology and resources, this is the lowest level to which water systems can reasonably be required to remove this contaminant should it occur in drinking water …

APEC (2011)

The MCLG (Maximum Contaminant Level Goal) is usually the starting point for determining the regulated Maximum Contaminant Level (MCL).

	n	Media	Máximo	Referencia
Embalse de La Serena	6	0,14	0,30	Berzas et al. (2009)
Corta de la mina El Entredicho	2	0,32	0,56	Gray et al. (2004)
Río Valdeazogues	12	2,11	6,20	Gray et al. (2004) y Berzas et al. (2009)
Arroyo Azogado	2	17,63	30,00	Gray et al. (2004)

Concentraciones de metilmercurio en las aguas superficiales del distrito. Todos los valores están expresados en ng l^{-1}.

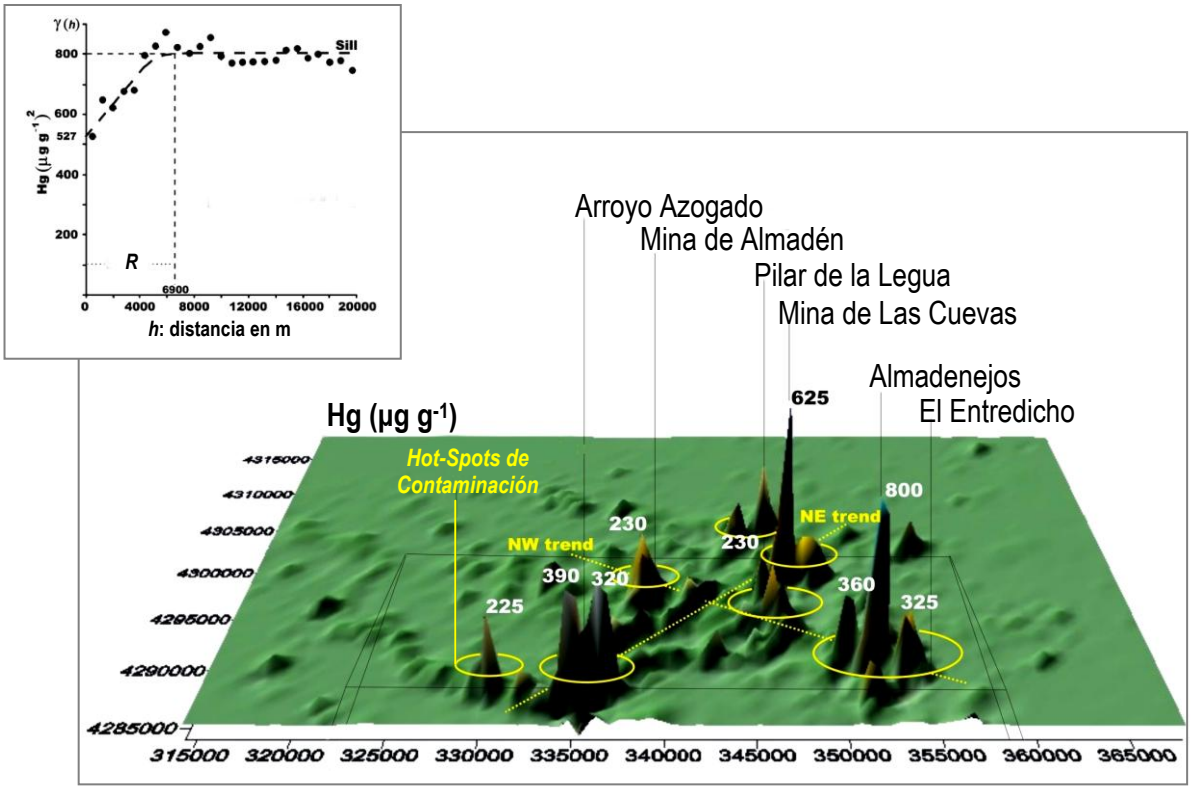
Los valores altos del Arroyo Azogado que llegan hasta 30 ng l^{-1} constituyen el máximo valor medido para este compuesto en aguas de áreas mineras a nivel mundial (Gray et al., 2004).



El Arroyo Azogado. Record mundial de metilmercurio en aguas de distritos mineros.

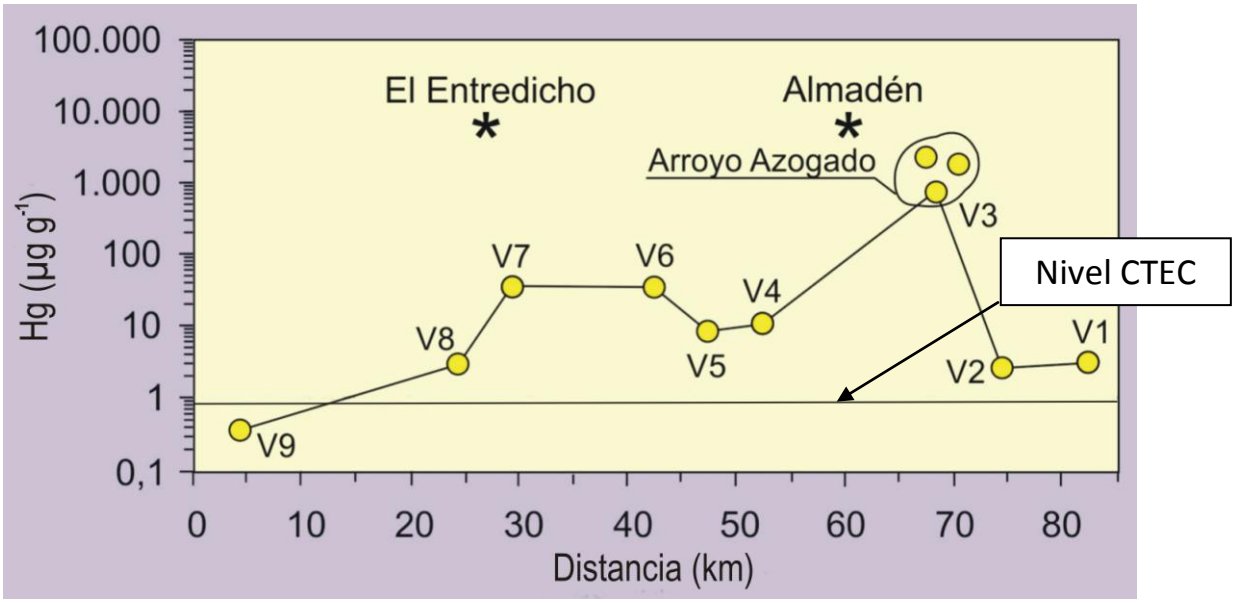
Sedimentos fluviales Los sedimentos fluviales de la región fueron analizados por la empresa minera MAYASA en los años 1980's como parte de una campaña de exploración regional. Posteriormente, Rodríguez-Martín et al. (2000) aportan datos en este campo. También nuestro equipo ha realizado muestreos y análisis de este tipo de muestras, con datos que se aportan en Gray et al. (2004) e Higueras et al. (2006). La reinterpretación de los datos de la campaña de la empresa minera en términos medioambientales, llevada a cabo por Cornejo (2005) e Higueras et al. (2006), pone de manifiesto que, como se ha descrito para las aguas superficiales, los valores máximos se detectan a lo largo del río Valdeazogues y en los tributarios que proceden de áreas mineras, como Almadén, Almadenejos o Las Cuevas.

Los análisis más recientes ponen de manifiesto, como los de la empresa minera, que los mayores contenidos se alcanzan en el río Valdeazogues durante su recorrido por el Distrito de Almadén, así como en los arroyos que drenan la zona urbana de Almadén.



Distrito de Almadén. Variograma experimental y mapa 3D por kriging puntual para concentraciones de mercurio en los sedimentos fluviales. Los datos se ajustan al modelo esférico aunque con un fuerte efecto pepita. R: rango. Dirección de la anisotropía: N45º. Adaptado de Higueras et al. (2006).

Hay que indicar que prácticamente todas las muestras de sedimentos del Río Valdeazogues superan el umbral de consenso para efectos dañinos en la salud (*consensus threshold effect concentration: CTEC*) fijado en 0,18 µg g^{-1} Hg (MacDonald et al., 2000):



Concentraciones de mercurio en sedimentos del Río Valdeazogues. CTEC: Consensus Threshold Effect Concentration.

Por su parte, Gray et al. (2004) y Berzas Nevado et al. (2009) aportan además datos de contenidos en metilmercurio en este tipo de muestras, que se sintetizan en la siguiente tabla:

	n	MeHg (ng g^{-1})	Referencia
Río Valdeazogues	8	0,32-82	Gray et al. (2004)
Río Valdeazogues	4	8,6-880	Berzas Nevado et al. (2009)
Embalse La Serena	6	2,4-6	Berzas Nevado et al. (2009)

Contenidos de metilmercurio (MeHg) en sedimentos fluviales; n: numero de muestras.

Como se indica en los dos trabajos antes citados se aprecia que los mayores contenidos en metilmercurio se relacionan con mayores contenidos en mercurio total. Por otra parte, como parecen indicar los datos de Berzas Nevado et al. (2009), se aprecia un notable decrecimiento en Hg_{total} desde los años 1974-1977 al periodo 2005-2006, lo que podría estar indicando que el cese de las actividades minero-metalúrgicas en el complejo de Almadén ha tenido repercusiones ambientales positivas.

Suelos Los suelos del distrito minero están afectados por una triple problemática:

- Existen suelos que presentan altos contenidos en mercurio sin que existan labores mineras, sino simplemente indicios de mineralización de escasa entidad. Se trata en este caso de anomalías geoquímicas.
- También están los suelos del entorno de las áreas mineras y metalúrgicas, en los que la presencia del mercurio se puede correlacionar con esta actividad y la dispersión inmediata de los productos derivados.
- En su conjunto los suelos de Almadén presentan contenidos en mercurio "extremadamente anómalos" si se comparan con la línea base de 0,01–0,03 µg g^{-1} Hg de Senesi et al. (1999).

En lo que se refiere a datos publicados sobre suelos del distrito estos corresponden principalmente a los trabajos de Higueras et al. (2003), Millán et al. (2006), Molina et al. (2006), Bueno et al. (2009) y Martínez-Coronado et al. (2011).

La siguiente tabla muestra una gran variabilidad en los datos aportados. Su análisis en detalle indica que la práctica totalidad de los datos pueden ser considerados como muy altos si se comparan con la línea base de Almadén de 20-22 µg g^{-1} Hg (Molina et al., 2006; Martínez Coronado et al., 2011):

	n	Hg (µg·g^{-1})	Referencia
4 áreas diferentes	67	6-8889	Higueras et al. (2003)
10 áreas diferentes	DND	5-1710	Millán et al. (2006)
30 localidades	34	0,13-2695	Molina et al. (2006)
Transecta	16	86,5-7315	Bueno et al. (2009)
CMA	16	25-15900	Martínez-Coronado et al. (2010)
CMA Alrededores	35	4-174	Martínez-Coronado et al. (2010)
Suelos no contaminados		0,01-0,03	Senesi et al. (1999)

Contenidos de mercurio en suelos del Distrito de Almadén y línea base de Senesi et al. (1999). DND: Dato no disponible; CMA: Cerco metalúrgico de Almadenejos.

Al respecto lo siguiente:

- Las concentraciones por encima de 100 µg g^{-1} se pueden considerar como propios de anomalías geoquímicas locales, áreas de indicios de cinabrio, antiguas áreas en las que se ha llevado a cabo metalurgia, áreas de acopio de materiales de escombrera minera, o caminos en los que se utilizó este tipo de materiales.
- Las concentraciones por encima de 800-1000 µg g^{-1} son ya únicamente propias de áreas minero-metalúrgicas con actividad importante.

Desde el punto de vista ecotoxicológico se considera como concentración crítica de un suelo la que se estima como posible causante de efectos tóxicos. En el caso del mercurio esta concentración crítica está fijada en el rango 0,3-5 µg g^{-1} (Kabata-Pendias, 2001). Considerando incluso el valor más alto de este rango, la mayor parte de los suelos del distrito estarían por encima del umbral crítico. También estarían por encima de la concentración máxima permisible para suelos agrícolas establecida en Reino Unido (1 µg g^{-1}), de la concentración propuesta por la Guía Canadiense de Calidad del Suelo para suelos agrícolas (6,6 µg g^{-1}), e incluso (en el entorno de las áreas mineras) por encima del nivel de intervención holandés de 36 µg g^{-1} (Appleton et al., 2006).

En lo que se refiere a especies de mercurio, en los suelos se han llevado a cabo distintos tipos de análisis entre los que destacan los de extracción secuencial (Sánchez et al., 2005), extracción pirolítica (Higueras et al., 2003), y la utilización de la técnica XANES (*X-ray Absorption Near Edge Structure*) para la detección de especies de mercurio (Esbrí et al., 2010):

- La técnica de extracción secuencial pone de manifiesto que al menos en el perfil de suelo analizado el mercurio se concentra en las fracciones menos solubles, en particular en la extraíble mediante HCl concentrado.
- La extracción pirolítica por su parte diferencia fundamentalmente entre la fracción correspondiente a cinabrio y la ligada a la fracción orgánica del

suelo, y detecta en las muestras analizadas razones que van desde 50/50 hasta 70/30 en favor de los contenidos en cinabrio.
- La técnica XANES ha puesto de manifiesto que las muestras de suelos presentan contenidos bajos a muy bajos en las especies de mercurio más solubles.

Escombreras y residuos metalúrgicos Buena parte de las principales escombreras de las principales minas del distrito están en la actualidad restauradas:

- La de la mina de Las Cuevas se restauró bajo suelo vegetal en el año 2003.
- En El Entredicho las escombreras se restauraron por fases entre 2000 y 2004, también por recubrimiento con suelo vegetal.
- La de Almadén es la que ha sido restaurada de forma más completa, con remodelación de pendientes y recubrimiento multicapa, a lo largo del año 2006.

No obstante, existen minas pequeñas cuyas escombreras no han sido restauradas, como las de La Nueva Concepción, o aún de menor entidad como la de Guadalperal. También existen acumulaciones de materiales de procedencia minera en diversos puntos del distrito, como por ejemplo en el Cerco de Almadenejos.

Estas escombreras y recintos abandonados presentan por lo general dimensiones modestas, pero en algunos casos, como en Almadenejos, representan focos notables de contaminación de su entorno, al menos potencialmente. El caso de Almadenejos es peculiar porque la zona más intensamente contaminada está contenida dentro de un recinto cercado, que evita en buena parte la dispersión de los productos contaminantes, pero no perfectamente, puesto que no puede evitar las emisiones a la atmósfera ni totalmente a las aguas superficiales.

Tailings are a common consequence of metal ore mining. Depending on the mineralogy of the mined ore and the process employed the tailings may contain elevated concentrations of toxic pollutants among them mercury. Metal ores that frequently contain mercury as an impurity include gold, silver, copper and zinc. Here mercury in most cases may occur as a sulphide but also elemental mercury may be found. At several stages of the ore processing mercury may be mobilized and released into the environment, most notable in gaseous form during roasting, smelting and refining operations. A part of the mercury remains in the liquid and solid phases that after processing are dumped in tailings. Mercury may also be found in tailings from gold and silver amalgamation. It is estimated that the application of this method in the past 500 years released around 300,000 t mercury to tailings and other environmental media.

Hageman y Schönwiese (2010)

Un factor interesante a considerar es el de la formación del mineral supergénico schuetteita ($Hg_3(SO_4)O_2$), de color amarillo-limón, un sulfato de mercurio que aparece recubriendo cantos en determinadas zonas preferenciales de las escombreras y de su entorno inmediato, e incluso en ladrillos de los antiguos hornos del Cerco de Almadenejos.



El Cerco de Almadenejos, suelos altamente contaminados debido la prologada exposición a los vapores que emanaban de los primitivos hornos Bustamante y el manejo de mineral de cinabrio. Arriba izquierda y derecha, restos de los hornos; abajo izquierda detalle de ladrillo recubierto con schuetteita, el mineral amarillo (flecha); a la derecha, los altísimos valores de mercurio gas que se miden en ese entorno con el LUMEX RA-915+, en este caso, 29.990 ng Hg m^{-3} (círculo).

Resulta evidente en base a la observación simple y directa que este mineral se forma en zonas en las que hay una salida de vapor de mercurio desde la escombrera, y que aparece exclusivamente en la zona de las rocas que recibe radiación solar; también se observa que se forma tanto en rocas que contienen mineral (cinabrio) como en aquellas sin mineral que forman parte de la escombrera. Todas las observaciones indican que la schuetteita se forma por condensación de mercurio metálico sobre las rocas, donde reacciona con el azufre para dar el sulfato, siempre bajo la acción fotocatalítica de la luz solar. Este mineral es desde el punto de vista físico-químico muy inerte, lo que estabiliza la presencia del mercurio en la escombrera, limitando la emisión de mercurio como lixiviados con mayores contenidos en el metal o mercurio gas.

Crespi et al. (2008) indican además para El Entredicho que las costras de schuetteita, tanto en la escombrera como en los afloramientos, se ven reemplazadas de forma muy irregular por costras de jarosita.

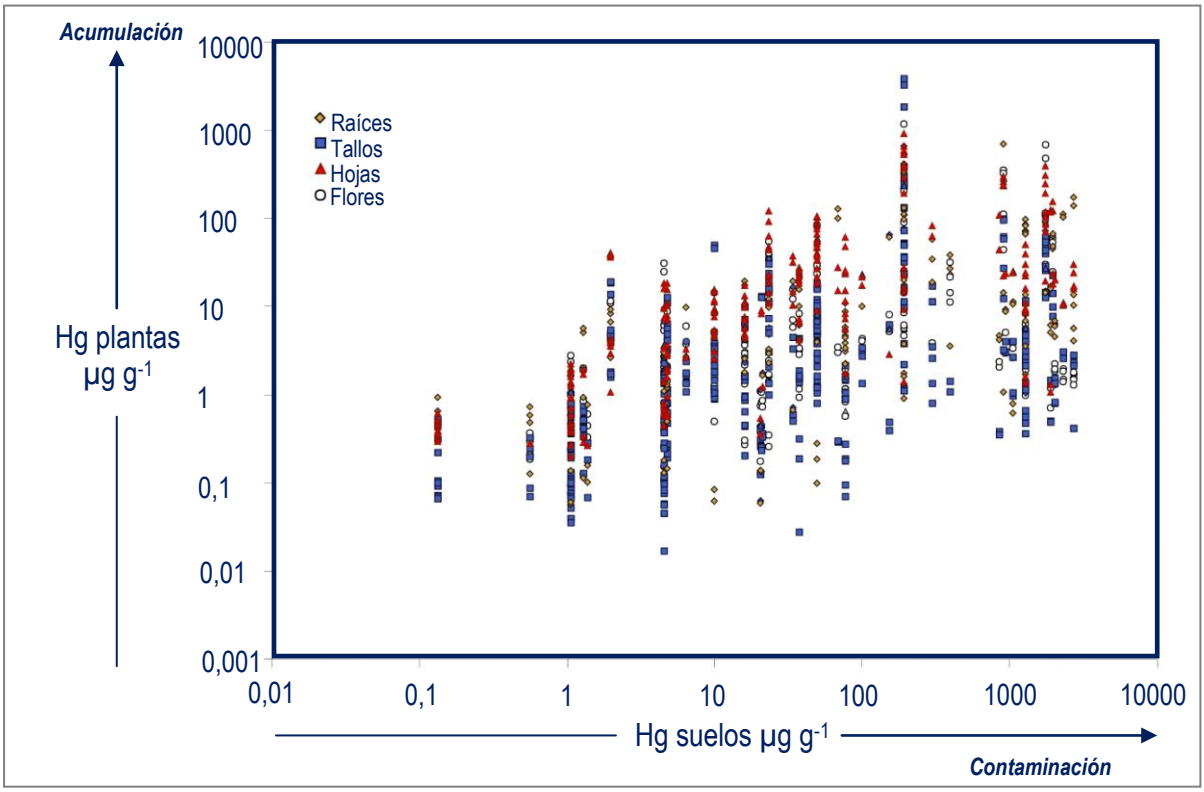


La antigua escombrera de Las Cuevas. Arriba antes de la restauración, cuando se producía una intensa formación de schuetteita sobre la cara expuesta al sol de los fragmentos de roca (recuadro y flechas amarillas); abajo, la escombrera durante la primera fase de restauración, alisado y recubrimiento con tierra vegetal (flecha roja).

También debemos resaltar el hecho de que ha sido precisamente en materiales de escombrera, y en concreto en residuos de calcinación de cinabrio de los hornos del recinto metalúrgico de Almadenejos, donde se han detectado las concentraciones de metilmercurio más altas del distrito (Gray et al., 2004). Esto parece indicar que el metilmercurio se forma preferencialmente en los productos de calcinación.

Biota Los datos disponibles sobre contenidos de mercurio en seres vivos del área minera se refieren a plantas (Higueras et al., 2004b; Millán et al., 2006; Molina et al., 2006; Martínez Coronado et al., 2011), a cangrejos de río (Higueras et al., 2006), a ganado porcino (Moreno et al., 2005) y a moluscos de río (Berzas Nevado et al., 2003). Los resultados se sintetizan a continuación.

En plantas se detectan variaciones muy importantes de unas especies a otras y entre los diferentes órganos de la planta. Molina et al. (2006) describen en detalle el comportamiento bioacumulador de las distintas especies, encontrando diferentes comportamientos, que pueden relacionarse con diferentes respuestas fisiológicas respecto al mercurio. Como dato a destacar, Martínez Coronado et al. (2011) describen contenidos en la planta comestible (y muy apreciada localmente) *Asparagus acutifolius*, el espárrago triguero, con concentraciones de hasta 140 µg g^{-1} en la parte aérea y 443 µg g^{-1} en las raíces, dentro del Cerco de Almadenejos. Esta variación (raíz-parte aérea) puede ser explicada por el efecto barrera que ejercen las raíces en suelos muy contaminados (Schwesig y Krebs, 2003).



Mercurio en suelos y plantas del Distrito Minero de Almadén. Adaptada de Molina et al. (2006).

Dos hechos resultan claros de una observación detallada de la figura superior:

1. El nivel de contaminación por mercurio de algunos suelos del Distrito Minero de Almadén es elevadísimo.
2. La respuesta de algunas plantas al fenómeno anterior se manifiesta a través de la acumulación e hiperacumulación de ese mercurio.

Por su parte, los valores encontrados en el cangrejo de río (*Procambarus clarkii*) resultan preocupantes al alcanzar el mercurio concentraciones en músculo (carne comestible del animal) y hepatopáncreas (la cabeza, con la que habitualmente se cocinan los ejemplares), de hasta 9,1 y 26,2 µg g^{-1} respectivamente (Higueras et al., 2006). Estos valores están muy por encima del máximo permitido para productos de la pesca por el Reglamento (CE) nº 466/2001 de la Comisión Europea, de 8 de marzo de 2001, que fija el contenido máximo de mercurio en productos de la pesca en 0,5-1,0 µg g^{-1} dependiendo de la especie (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2011).

Los datos para ganado porcino se refieren al pelo de cerdos que viven en el Cerco de Almadenejos, y corresponden a valores de 8-10 µg g^{-1} (Moreno et al., 2005). Comparando con los valores para humanos y el valor máximo recomendado de la

OMS (WHO), de 1 µg g^{-1}, se puede concluir que la exposición de este ganado al mercurio en el Cerco de Almadenejos se traduce como cabría esperar en una considerable incorporación del elemento al organismo. La absorción probablemente se realiza de manera orgánica, puesto que es esta fracción del mercurio la que se acumula en cabello (Phelps et al., 1980; McDowell et al., 2004; Johnsson et al., 2004; Diez, 2009).



A la izquierda, el cangrejo de río Procambarus clarkii (imagen[7]); a la derecha, cerdos alimentándose en el Cerco de Almadenejos.

Los moluscos de río analizados por Berzas Nevado et al. (2003) corresponden a bivalvos de agua dulce, que alcanzan concentraciones de entre 1 y 4 µg g^{-1}, con una proporción de metilmercurio del orden del 30%. Afortunadamente estos moluscos no son objeto de consumo humano, pues también superan el valor máximo permitido antes mencionado de 0,5 µg g^{-1}.

5.1.5 Resumiendo

Hemos revisado el Distrito Minero de Almadén analizando su problemática ambiental desde diversos ángulos. Los hechos más importantes son:

1. Los yacimientos de mercurio del distrito de Almadén son la consecuencia de un proceso geológico único a nivel mundial. Entre sus consecuencias están la formación de una anomalía geoquímica también única a nivel mundial, que ha supuesto la acumulación en un área muy reducida de casi un tercio de las reservas explotables de un elemento singular como es el mercurio. No hay ningún otro caso conocido de tal concentración geológica diferencial. Sin entender esto, poco podemos hacer para entender el tema ambiental.
2. Desde el punto de vista ambiental, los yacimientos de mercurio del distrito han significado una importante fuente de contaminación, que existía ya en forma de “anomalía geoquímica”, antes de iniciarse la minería en el distrito.

3. Los efectos de la actividad minera han amplificado la dispersión del mercurio, de forma que la "anomalía geoquímica" se ha transformado en "contaminación", lo que implica un área afectada más grande y mayores concentraciones del elemento en los diferentes compartimentos ambientales.
4. Como consecuencia de estos hechos los suelos presentan concentraciones de mercurio que superan casi de forma sistemática el umbral de valores críticos de toxicidad propuesto por Kabata-Pendias (2001); los sedimentos fluviales alcanzan concentraciones del elemento que representan hasta 880 veces el umbral canadiense para la protección de la vida acuática; las aguas superficiales alcanzan concentraciones que superan sistemáticamente los valores de referencia para vida acuática, y ocasionalmente, en áreas evidentemente contaminadas, los valores límites para aguas potables.
5. La atmósfera presenta en la proximidad inmediata de los focos conocidos (ex zonas mineras y metalúrgicas) concentraciones que o bien se acercan a las máximas recomendadas para zonas residenciales (Almadén), o las superan en los meses de verano (Almadenejos). Por otra parte, de acuerdo con datos recientes, y de acuerdo con la interpretación retrospectiva de los mismos, la población de Almadén debió estar sometida a concentraciones muy por encima de los valores máximos recomendados para áreas urbanas o residenciales hasta el cese de la actividad metalúrgica en 2003 y la posterior restauración de la escombrera. El caso de Almadenejos sigue siendo preocupante.
6. La presencia de mercurio en los medios inorgánicos ha implicado su trasferencia a los seres vivos en concentraciones muy variables, y que resulta un peligro real en algún caso como en el de los cangrejos de río y los espárragos, tanto por los altos valores que han llegado a medirse en los mismos como por el hecho de ser especies que son objeto de consumo alimentario local.
7. Como conclusión más positiva podemos establecer que de acuerdo con los estudios realizados, el cese de la actividad minera y metalúrgica en el distrito ha supuesto una importante reducción en las concentraciones de mercurio observadas en la atmósfera así como en sedimentos fluviales. Esto, claro está, excluyendo el caso del Cerco de Almadenejos.
8. Por otra parte, como señalan Oyarzún y Oyarzun (2011), la Unión Europea ha declarado ilegal la exportación de mercurio metálico y algunos compuestos de mercurio (European Union Regulation (EC) no. 1102/2008; Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2010) tales como cinabrio, cloruro de mercurio, óxido de mercurio, y mezclas de mercurio metálico con otras substancias donde la concentración de mercurio sea al menos de 95% (Health Care, 2011). Así mismo se ha prohibido la venta de

termómetros de mercurio por completo y la venta de dispositivos de mercurio para medir la tensión arterial (Health Care, 2011). Además, desde el 15 de Marzo de 2011 las siguientes formas de mercurio son consideradas como “residuos” y por lo tanto, deben ser almacenadas como tales siguiendo la normativa comunitaria de la Unión Europea (Waste Framework Directive 2006/12/EC2): el mercurio metálico que ya no es usado en la industria cloro-cáustica, el mercurio obtenido de la limpieza del gas natural, el mercurio obtenido de la metalurgia de metales no ferrosos, y el mercurio metálico extraído de cinabrio (Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2010).

5.2 Estudiando cuencas hidrográficas en Chile, fallos y aciertos

5.2.1 Introducción

Esta sección está basada en varios trabajos publicados por los autores, que fueron luego sintetizados en otro más reciente en la revista Tierra y Tecnología del Colegio de Geólogos de España (Oyarzun et al., 2010).

El mundo moderno de la investigación está plagado de proyectos con curiosos acrónimos, cada proyecto con ingentes números de investigadores de diferentes universidades u organismos de investigación (nacionales y/o internacionales), y objetivos a veces más destinados a "encajar" en las "grandes" líneas de investigación que cualquiera otra cosa. Hay que estar "en el ajo", porque el que se mueve "no sale en la foto", léase: no obtiene fondos de investigación, que tal como están las cosas hoy en día, son "la sal" de la vida de los organismos de investigación.

> *… Un trabajo científico que desafíe los principios de la "buena ciencia" (mainstream science) tiene pocas o ninguna posibilidad de ser publicado, con lo cual llegamos al pilar final del desastre: hay que publicar, sí, pero sin desafiar (demasiado) a la ortodoxia y sobre todo, a quienes deciden que es buena o mala ciencia.*
>
> *La ciencia necesita justamente lo contrario, investigadores que pongan en tela de juicio las ideas que prevalecen. Necesita además de un cierto caos. Al respecto resulta sorprendente que en los impresos de algunas convocatorias de proyecto se pregunte a los investigadores cosas tales como: cuales serán los resultados esperados del proyecto (¿si sabemos lo que vamos a encontrar para que molestarse y gastar dinero en buscarlo?), o en que revistas se publicarán los resultados de dicho proyecto …*
>
> *Oyarzun (2007)*

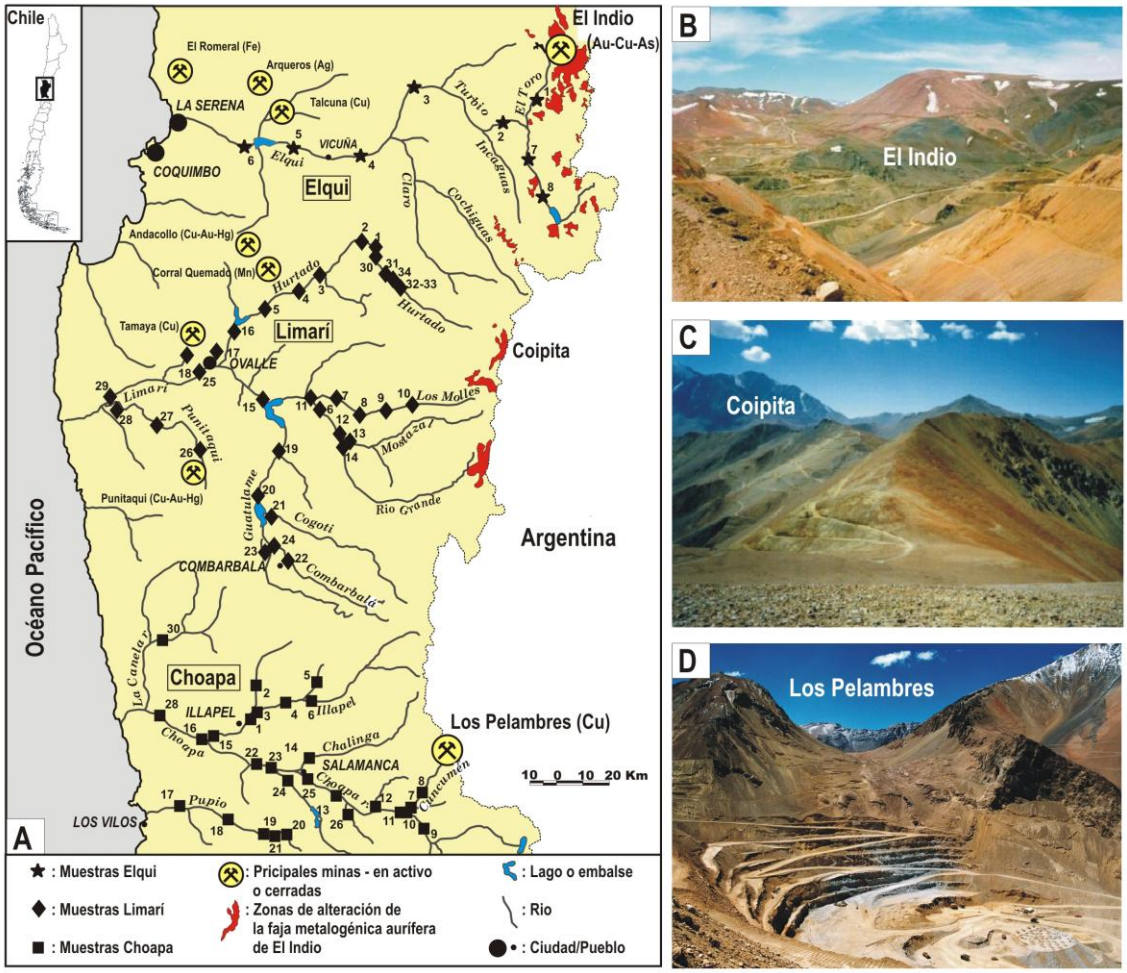
¿Pero, es esto así sin más? ¿Existen caminos alternativos al (burocráticamente) estricto control ejercido por el sistema? ¿Puede la investigación y los investigadores escapar de los formatos impuestos? A continuación contamos una historia sobre cómo se puede realizar ciencia aplicada de calidad mediante procedimientos "alternativos", cómo se pueden abordar seriamente temas de interés científico y social, y sobre todo, por qué hay que huir de las hipótesis de trabajo rígidas.

Lejos de la retórica de la colaboración España – Iberoamérica y más aún del complejo entramado de los grandes proyectos de investigación, a comienzos de los años 2000s un grupo de geólogos de las Universidades de Castilla - La Mancha (UCLM), Complutense (UCM), La Serena (ULS) (Chile), y Rey Juan Carlos (URJC) comenzó a desarrollar una serie de trabajos de investigación en temas minero-ambientales en el norte de Chile. Como resultado de estos contactos y trabajos iniciales se creó el GEMM (Grupo de Estudios en Minería y Medioambiente), grupo virtual a través de Internet, de acceso libre (www.aulados.net/GEMM/GEMM.html), que en la actualidad sirve como plataforma docente y de investigación a través de los numerosos cursos, documentos y libros *on-line* allí presentes.

A continuación se esbozan los antecedentes del tema que trataremos aquí, el marco geológico, fisiográfico y climático, y se reseñan tres "paradojas ambientales" que surgieron durante el curso de las investigaciones. Estas últimas están planteadas en tres apartados que podríamos denominar: 1) la contaminación milenaria; 2) la contaminación en ausencia de actividades mineras; y 3) en lo que se refiere a contaminación, el tamaño del yacimiento no importa.

5.2.2 El estudio geoquímico de grandes cuencas fluviales

Los trabajos ambientales se centraron en las tres principales cuencas hidrográficas de la Región de Coquimbo (de norte a sur): Elqui (9800 km^2), Limarí (11760 km^2) y Choapa (8124 km^2). Las cuencas se estudiaron en este orden durante el curso de tres sucesivas campañas de campo en los años 2002, 2004 y 2006.



Cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa, Región de Coquimbo - Chile, mostrando las principales minas, zonas de alteración hidrotermal, y las campañas geoquímicas (A). A la derecha, el yacimiento aurífero epitermal de El Indio (B), el prospecto (de origen epitermal) Coipita (C), y el pórfido cuprífero de Pelambres (D).

Para poder entender adecuadamente un problema de contaminación por metales pesados y metaloides no basta con realizar una campaña de toma de muestras para su estudio geoquímico, además se debe contar con información sobre el clima, el marco geológico y fisiográfico, y por supuesto, sobre la actividad minera que se realiza en la zona bajo estudio. Algunas de las labores mineras en la Región de Coquimbo se localizan a más de 4000 m sobre el nivel del mar, y se encuentran solo a poco más de 100 km de la costa, lo que genera un gradiente de altitud muy pronunciado. Las precipitaciones en esta zona de altura (nieve + lluvia) son de unos 180 mm.

Sin embargo, bajo una perspectiva geológica, más amplia en el tiempo, toda la región del denominado "Norte Chico" de Chile (27º-33º S) ha estado sujeta a importantes cambios climáticos durante el Holoceno. Estos cambios han sido el resultado de la fuerte variabilidad de los vientos del Oeste (*Westerlies*) (Veit, 1996). Un incremento en la actividad de estos vientos, con actividad de frentes, se correlaciona bien con los años de El Niño. Un año importante de El Niño suele tener consecuencias catastróficas para la región, como aquellas de 1997, cuando carreteras y puentes fueron cortados por aluviones, literalmente aislando la región del resto del país. Estas lluvias tienen gran capacidad de arrastre de sedimentos y pueden tener efectos catastróficos en la remoción de escombreras de minerales, balsas, etc.

La geología de la IV Región de Chile incluye una gran variedad de unidades geológicas que van desde el Paleozoico al Terciario. De importancia metalogénica son dos:

- La faja del Cretácico Inferior que incluye unidades volcánicas, volcanosedimentarias, y sedimentarias marinas intruídas por un batolitito granítico del Cretácico Medio, dispuestas en una posición centro occidental dentro de la región; estas formaciones albergan, entre otros, importantes yacimientos de hierro tipo Kiruna como el del Romeral, cobre-plata del tipo estratoligado (Talcuna), cobre-oro-mercurio del tipo pórfido cuprífero y epitermal (Andacollo), cobre-oro-mercurio del tipo epitermal (Punitaqui), manganeso del tipo estratoligado (Corral Quemado) y de plata epitermal (Arqueros) (Oyarzun et al., 1996, 1998, 2003).
- Una serie de secuencias volcánicas del Terciario, en el sector de la cordillera de los Andes entre las cuales dos son particularmente relevantes bajo el punto de vista metalogénico (Maksaev et al., 1984; Oyarzun et al., 2007b): la Formación Doña Ana (Oligoceno Superior – Mioceno Inferior), con riolitas, tobas riolíticas, andesitas y andesitas basálticas, y la llamada Unidad Infiernillo. Esta última unidad intruye la Formación Doña Ana y consiste en pequeños cuerpos de granito, granodiorita, monzodiorita, y

pórfidos andesíticos. Estas intrusiones indujeron fenómenos de alteración hidrotermal generalizados que entre otros dieron lugar a la formación de depósitos minerales de gran altitud como El Indio (Cu-Au-As) (Araneda, 1985; Bissig et al., 2002). Las zonas de alteración hidrotermal incluyen asociaciones minerales típicas de la alteración argílica avanzada, con caolinita, alunita, y jaspes silíceos. El desarrollo de estos minerales, junto a otros típicos de la alteración supergénica (limonitas: goethita, jarosita) le da a la zona brillantes colores que van desde el violáceo, al rojo hasta los colores amarillentos. Un poco más al sur de la faja de epitermales se encuentra un pórfido cuprífero del Mioceno Superior de grandes dimensiones: Los Pelambres. El pórfido cuprífero de Los Pelambres (Guzmán, 1986) está albergado por un complejo intrusivo emplazado en una secuencia de rocas andesíticas del Cretácico Superior. El complejo intrusivo comprende un stock principal tonalítico, pequeños pórfidos y algunos diques post-mineralización de andesita y aplita. Las rocas fueron hidrotermalmente alteradas a facies potásica, propilítica y fílica. Un aspecto destacado del pórfido de Los Pelambres es la escasa importancia de minerales ricos en arsénico (enargita, tennantita).

5.2.3 Contaminación milenaria en la cuenca del Elqui

Si bien todos los implicados en estas investigaciones conocían la presencia de importantes labores mineras en la alta cordillera (nacientes del Río Elqui), en el sector de la mina El Indio (Au-Cu-As), nadie estaba preparado en 2002 para lo que iba a ocurrir después, cuando los primeros resultados de la campaña de muestreo de sedimentos fluviales estuvieron disponibles. Estos datos iban a cambiar radicalmente el enfoque de la investigación e incentivar el disponer de un conocimiento más amplio sobre una región con importantes mineralizaciones epitermales de metales preciosos y pórfidos cupríferos en la alta cordillera.



Izquierda, zonas de alteración en la alta cordillera en la inmediaciones de El Indio; al fondo el Cerro Tórtolas (6160 m de altitud); a la derecha, la mina de El Indio (imagen[8]).

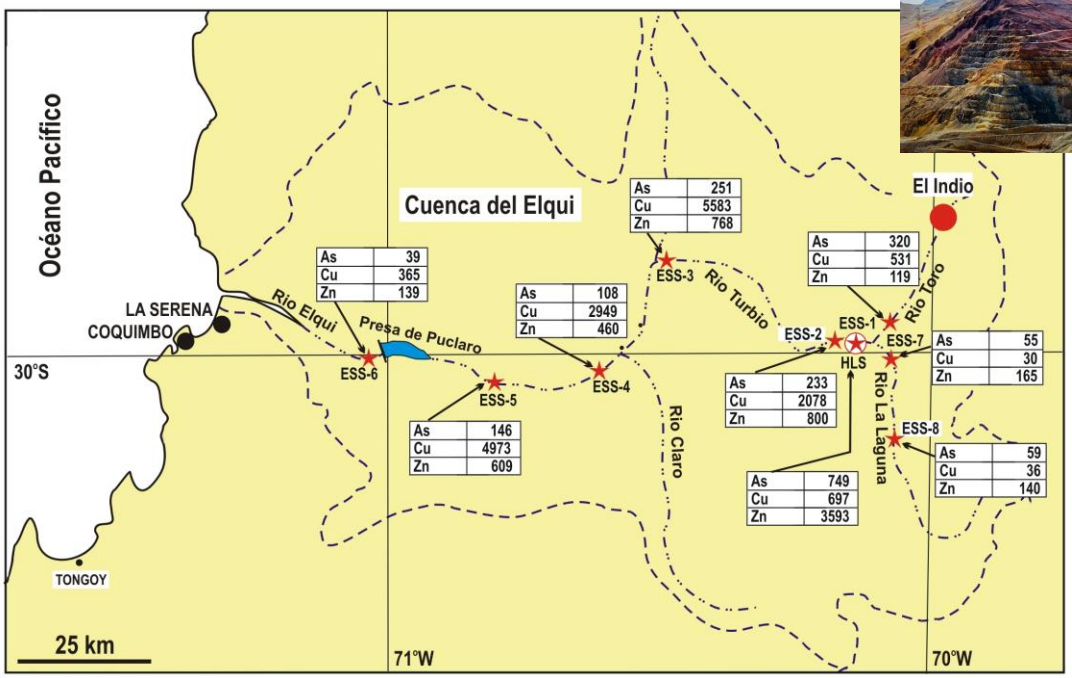
Así, inicialmente la campaña de muestreo de 2002 en la cuenca del Elqui mostró lo "esperable" en cuanto a la contaminación de los sedimentos fluviales. Los sedimentos estaban fuertemente enriquecidos en arsénico, cobre y zinc. Comparados con valores de sedimentos de referencia (Rössler y Lange, 1972), cobre y zinc se encontraban enriquecidos por factores de entre 119 y 184 veces. Comparadas a valores de referencia para arsénico, las muestras de este estudio estaban enriquecidas hasta factores de 90 a 470 veces (Oyarzun et al., 2004).

El Indio *is a high sulphidation Au-Ag-Cu deposit hosted by welded ash flow tuffs that underlie andesitic volcanics in a north-south striking fault bounded depression. Mineralisation appears to be related to the emplacement of small felsic domes and is of late Miocene age. The ore is present as fault controlled veins covering an area of 500 x 150 m. Mineralisation was emplaced in two well defined phases, namely initial massive enargite-pyrite veins, and second stage quartz-gold veins. The massive sulphide veins are accompanied by kaolinite and lesser alunite alteration and are rich in Cu, but gold poor. The second stage has associated sericite and lesser pyrophyllite, with local bonanza gold grades. Total production plus reserves are quoted as 23.2 mt @ 6.6 g/t Au, 50 g/t Ag, 4% Cu. Past production of bonanza grade ore totalled 0.5 mt @ 121 g/t Au.*

Porter GeoConsultancy (2001)

Sin embargo, un hecho cambiaría radicalmente nuestra visión previa sobre las causas de la contaminación. Durante el recorrido a lo largo del río Turbio llamó la atención una secuencia de sedimentos colgados en las paredes del valle. Solo por curiosidad se tomó una muestra de dichos sedimentos de aspecto lacustre (muestra HLS). La sorpresa fue grande, cuando esa muestra entregó los más altos niveles de arsénico de toda la cuenca.





Concentraciones (μg g^{-1}) de arsénico, cobre y zinc en muestras de sedimentos fluviales en la Cuenca del Río Elqui, campaña de 2002. También se muestra la localización del yacimiento El Indio.



Afloramiento de sedimentos lacustres del Holoceno donde se tomó la muestra HLS.

Eso llevó a un nuevo muestreo, esta vez específico para la secuencia, incluyendo la obtención de una muestra rica en carbono orgánico para su datación por C^{14}. Los resultados confirmaron el carácter rico en arsénico de la secuencia, y una segunda sorpresa llegó con la edad de esas rocas. El resultado de la datación indicó una edad de 9640±40 años: comienzos del Holoceno, cuando el clima de la Tierra se suavizaba dejando atrás la última edad fría y seca (*Younger Dryas*), permitiendo así las lluvias y por lo tanto la erosión fluvial. En otras palabras, la contaminación por metales pesados y metaloides derivada de la zona mineralizada de El Indio tenía un carácter milenario (Oyarzun et al., 2004, 2006a).

Dada la naturaleza de los trabajos mineros en el distrito minero de El Indio era relativamente fácil, a primera vista, encontrar un claro culpable en lo que respecta a la contaminación por arsénico en la cuenca del Elqui. Sin embargo, para analizar correctamente el tema de la dispersión de elementos químicos es importante tomar en cuenta otro factor. Una vez que comienzan los procesos erosivos de un yacimiento, los metales son lixiviados y transportados, dando lugar a lo que podríamos denominar una "contaminación natural" de los ríos. Cuanto más prolongado e intenso sea el proceso, más grandes serán los efectos. Si tomamos en cuenta que la secuencia lacustre del Holoceno temprano presentaba altos valores de arsénico, tendríamos que concluir que el problema de la contaminación en esta zona databa desde hacía (al menos) unos 10.000 años.

¿Significa esto que las actividades mineras en la zona no tienen nada que ver con el problema de la contaminación? Difícilmente; sería poco razonable pensar que la preparación de las áreas mineras, la extracción de minerales, y la metalurgia no han contribuido con arsénico y cobre al sistema (Oyarzun et al., 2006b). Sin embargo, es importante que sepamos que en el caso del Elqui no basta con el cierre de la mina de El Indio (o de su operación metalúrgica) para que la contaminación deje de existir. Dado que se trata de un problema milenario, es importante que las autoridades tomen este dato en consideración para cualquier análisis futuro de riesgos ambientales en la zona.



El embalse de Puclaro y el Valle del Elqui. A la izquierda, aguas arriba; derecha, aguas abajo.

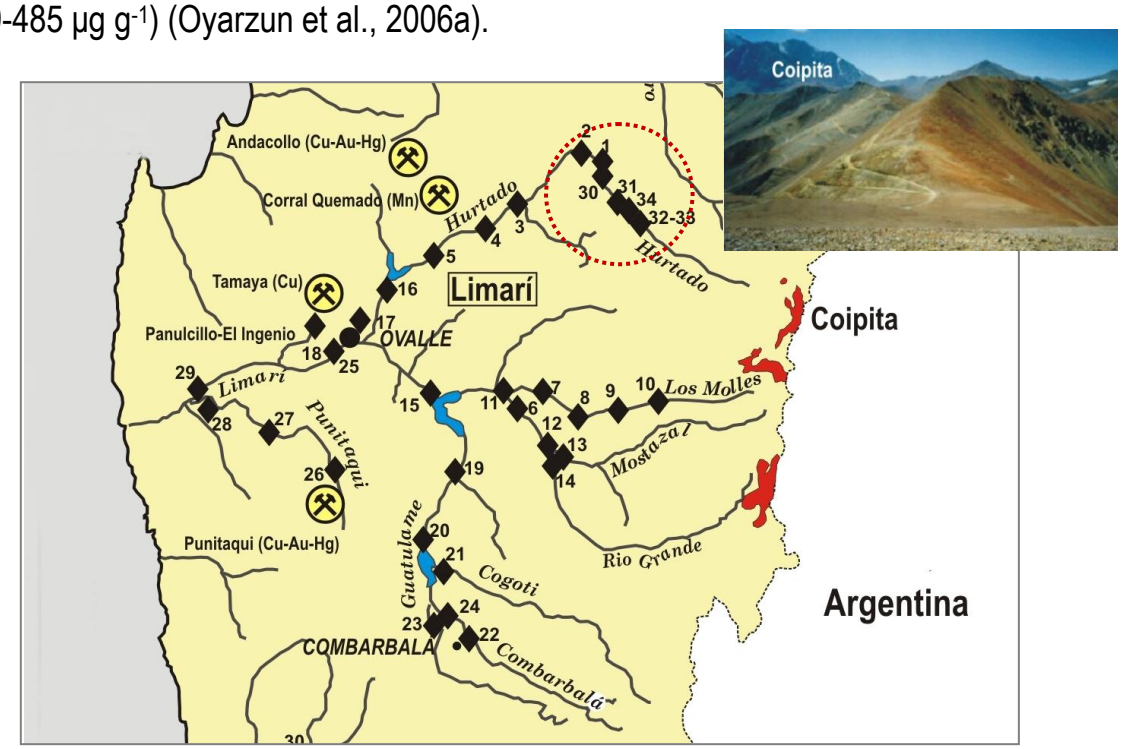
Llegados aquí resulta importante llamar la atención sobre otro fenómeno. Si se observa con detenimiento la figura que muestra las concentraciones de As, Cu y Zn, veremos un quiebre importante en cuanto a los contenidos de arsénico aguas arriba y abajo del embalse de Puclaro. Resulta evidente que la presa (con una capacidad para 200.000.000 m^3) está reteniendo sedimentos ricos en arsénico, y que como tal, representa un reservorio secundario actual de este elemento.

5.2.4 Cuando no hacen falta explotaciones mineras para que exista una fuerte contaminación por metales pesados: la cuenca del Limarí

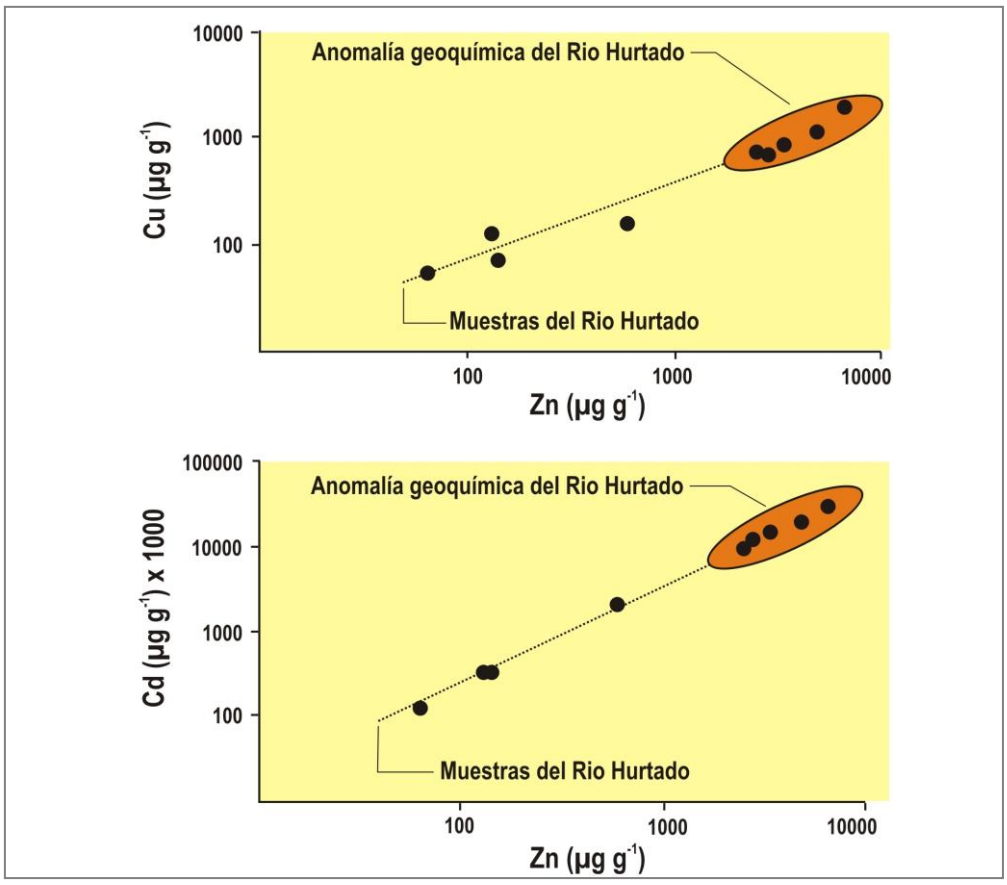
Los resultados de la campaña de 2002 en la cuenca del Elqui llevaron a plantearse nuevos estudios en las cuencas del sur de la Región de Coquimbo. Así se decidió muestrear la cuenca del Limarí en 2004. La idea inicial era que dado que no había actividad minera en la alta cordillera de dicha cuenca, la contaminación por metales pesados debía ser mucho menor. En otras palabras, serviría como "línea base", a modo comparativo entre la cuencas del Elqui (con la mina de Au-Cu-As de El Indio) y la del Choapa (con la gigantesca mina de Cu de Los Pelambres).

Nada fue así, y los sedimentos fluviales del río Hurtado iban a entregar elevadas concentraciones de cobre (53-1881 μg g^{-1}), zinc (64-6586 μg g^{-1}) y cadmio (130-31348 ng g^{-1}), mientras que las concentraciones de arsénico tenían valores

elevados (6-186 µg g^{-1}) pero no tanto como los observados en la cuenca del Elqui (39-485 µg g^{-1}) (Oyarzun et al., 2006a).



Muestreo del año 2004 en la Cuenca del Río Limarí y la anomalía del Río Hurtado (círculo rojo). Para detalles de la leyenda ver figura inicial.



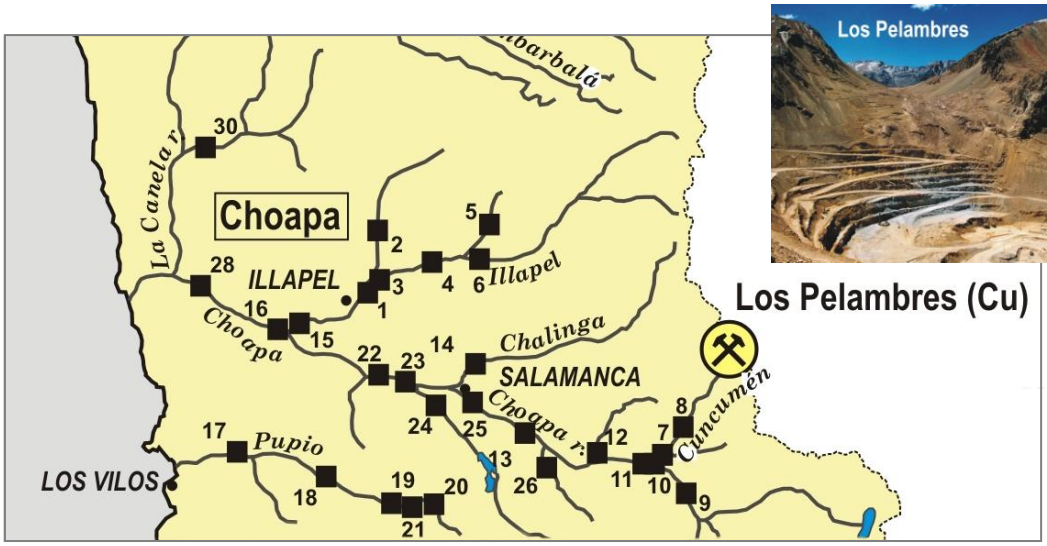
La anomalía del Río Hurtado.

En Chile la minería es un asunto económico importante, y las compañías no suelen entregar fácilmente sus datos respecto a potenciales yacimientos (prospectos). Finalmente se tuvo acceso a cierta información respecto a una de las zonas de alteración en la cabecera del río Hurtado: Coipita, prospecto al que por fin pudo achacársele la anomalía geoquímica de Cu-Zn-Cd-As observada en los sedimentos fluviales del río Hurtado. Hasta donde sabemos, el prospecto no ha cambiado su estatus. ¿Tendrá algo que ver esto con los "relativamente bajos" (en términos comparativos) valores de arsénico encontrados? Recordemos que el arsénico es un metaloide ampliamente distribuido en las mineralizaciones epitermales de metales preciosos en la cadena andina, formando dos importantes minerales de mena: tennantita y enargita. Ambos son además minerales de cobre, y este último es un metal importante en las explotaciones auríferas. Si hay bajos contenidos de arsénico es probable que los contenidos en cobre también lo sean, y por lo tanto, la rentabilidad de un depósito podría verse comprometida, particularmente si las leyes de oro no son particularmente altas.

Cualquiera sea el caso, si algo quedó claro de manera definitiva, es que no es necesario que existan explotaciones mineras en un sector cordillerano para que la contaminación por metales sea intensa (Oyarzun et al., 2006a).

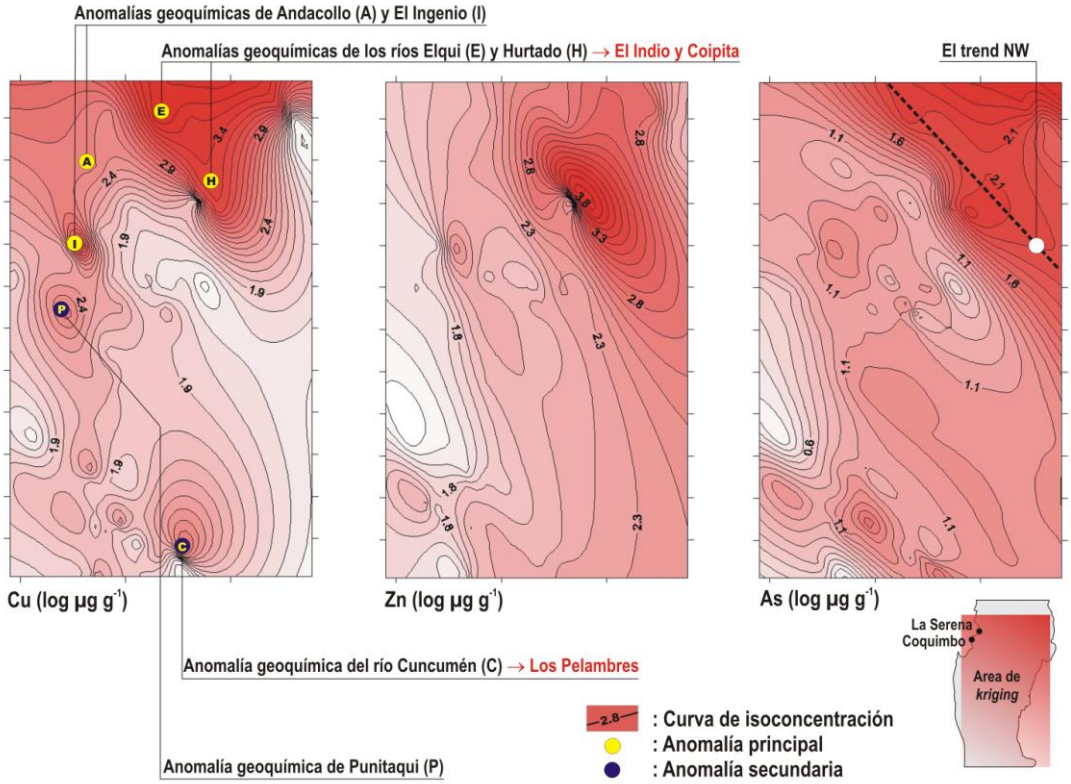
5.2.5 El tamaño "no" importa, la cuenca del Choapa

El estudio de la cuenca del Choapa en 2006 entregó curiosos resultados. La presencia y explotación del gigantesco pórfido cuprífero de Los Pelambres en la alta cordillera hacía prever elevados niveles de contaminación en los sedimentos fluviales, sin embargo, nada de eso se observó (Oyarzun et al., 2007c). En este sentido, cabía preguntarse "por qué" el tamaño de Pelambres no importaba.



Muestreo del año 2006 en la Cuenca del Río Choapa. Para detalles de la leyenda ver figura inicial. La foto de Pelambres data de la época inicial de los trabajos a cielo abierto.

Factores clave que controlan el comportamiento ambiental de un yacimiento mineral incluyen los minerales de mena y ganga, la litología del encajante y la alteración hidrotermal, los cuales a su vez influyen en la respuesta química de un yacimiento (Plumlee, 1999; Plumlee y Nash, 2004). Las grandes anomalías geoquímicas de Elqui y Hurtado y la menor de Los Pelambres merecen un completo análisis que contemple los numerosos factores geológicos que controlan la dispersión de los metales.



Mapas geoquímicos de cobre, zinc y arsénico para las cuencas del Elqui, Limarí y Choapa, realizados mediante kriging puntual. Adaptada de Oyarzun et al., 2007c

Las mineralizaciones de El Indio (anomalía Elqui), Coipita (anomalía Hurtado) y Los Pelambres (anomalía del río Cuncumén) comparten algunos rasgos geológicos y fisiográficos pero difieren fundamentalmente en otros. Por ejemplo, las tres mineralizaciones son de edad Mioceno, se relacionan con rocas magmáticas félsicas, y están emplazadas a lo largo de la cadena andina a gran altitud. Sin embargo, las dos primeras son del tipo epitermal mientras que Los Pelambres es un pórfido cuprífero. ¿Podía ser significativo este hecho?

El Indio y Coipita presentan fuertes y extensas zonas de alteración del tipo argílica avanzada. Esto tiene fuertes implicaciones en lo que se refiere a la dispersión de metales, porque este tipo de alteración disminuye de manera fundamental la capacidad de tamponamiento (*buffering*) de las rocas albergantes. La química de estos procesos se puede resumir de la siguiente manera: la fuerte hidrólisis durante la actividad hidrotermal lleva a la destrucción de los feldespatos a través

de la subsecuente formación de sericita (1), caolinita (2) y aún alunita si hay ácido sulfúrico presente en el sistema (3), lo cual es común en los sistemas de alta sulfurización (Heald et al., 1987):

(1) $3KAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 2K^+$
(2) $2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 2H^+ + 3H_2O \rightarrow 3Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+$
(3) $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 4H^+ + 2(SO_4)^{2-} \rightarrow KAl_3(SO_4)_2(OH)_6 + 3SiO_2$

Esto es particularmente relevante al caso de los yacimientos epitermales de alta sulfurización, que son ricos en pirita y otros sulfuros. Así cuando comienza la oxidación de la pirita (4) no quedan minerales como los feldespatos que puedan reaccionar con el ácido generado durante la oxidación de los sulfuros. Esto incrementa la movilidad del cobre a partir de calcopirita (5) o del cobre y arsénico a partir de la enargita (6).

(4) $4\ FeS_2 + 10\ H_2O + 15\ O_2 \rightarrow 4\ FeOOH + 16\ H^+ + 8\ (SO_4)^{2-}$
(5) $CuFeS_2 + O_2 + 2\ H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + FeSO_4 + 2\ H_2O + 2\ S$
(6) $Cu_3AsS_4 + 2.75\ O_2 + 3\ H_2SO_4 \rightarrow 3\ CuSO_4 + 4\ S + H_3AsO_4 + 1.5\ H_2O$

Por el contrario, el pórfido cuprífero de Los Pelambres presenta alteración potásica, fílica y propilítica. La formación de biotita o feldespato potásico secundario (alteración potásica) no afecta significativamente la reactividad de las rocas encajantes, mientras que la alteración propilítica incluso la aumenta (formación de calcita). Además la sericita de la alteración fílica es también un consumidor de H^+ (2) durante los procesos hidrolíticos supergénicos. De esta manera la capacidad de tamponamiento de las rocas en Los Pelambres siguió siendo importante y la dispersión de metales se redujo mucho (Oyarzun et al., 2007c).

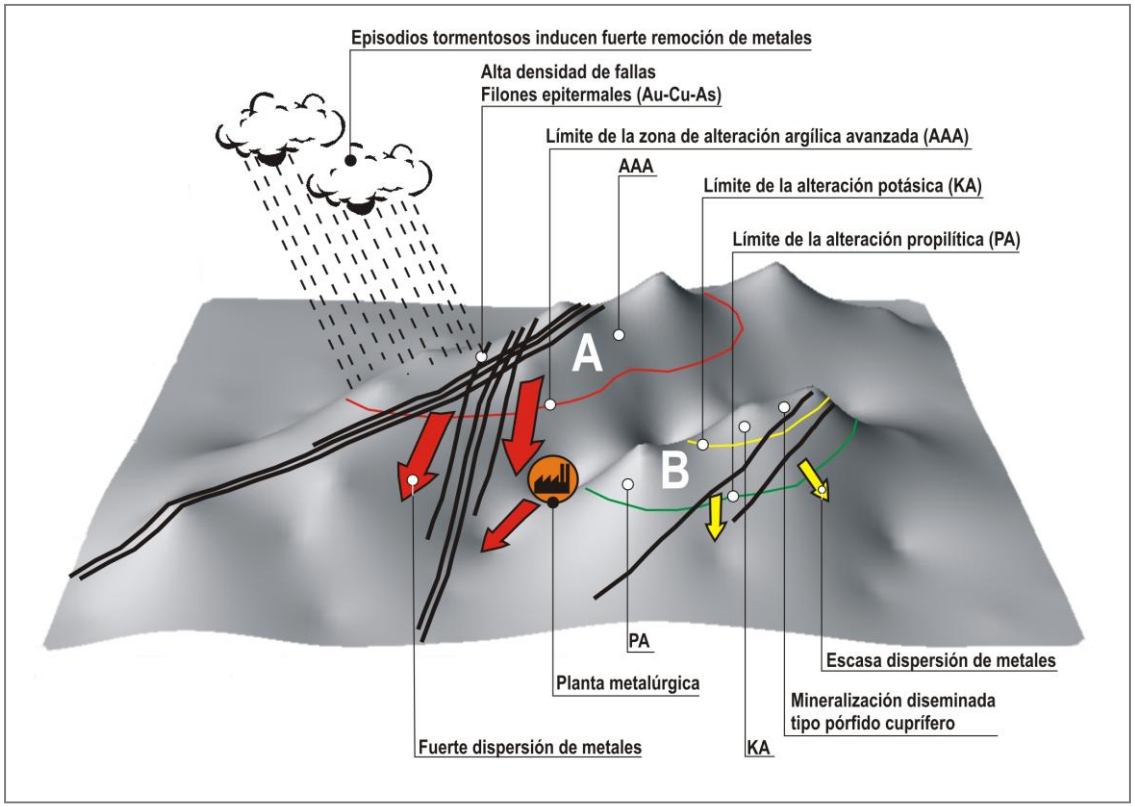
5.2.6 La búsqueda de un modelo

Los problemas fundamentales de contaminación (natural y/o antrópica) en las cuencas hidrográficas estudiadas en la IV Región de Chile se derivan principalmente de la remoción de As, Cu y Zn desde las zonas de alteración y explotaciones mineras de gran altitud. A esto contribuyen diversos factores, entre los que tenemos los fisiográficos y climáticos. Durante la estación de lluvias, especialmente en los años de El Niño, estos materiales van a parar directamente a los cursos fluviales principales de esta región, entre ellos, los ríos Elqui, Hurtado, y Limarí. Dado que la Región de Coquimbo sostiene una importante actividad agrícola, la situación es preocupante.

Pero la dispersión de metales y metaloides es más que un hecho que responda de manera exclusiva a una temática climático-fisiográfica. Existen tres factores geológicos que tienen mucho que decir al respecto:

- La intensidad de la fracturación, a escala local y regional. Mientras más fracturada una zona, más fáciles serán los procesos de erosión y por lo tanto remoción. Así, la cubierta de un yacimiento será desmontada rápidamente y los procesos de oxidación-lixiviación actuarán rápida y efectivamente. Al respecto, resulta significativo que la fracturación regional es mucho más intensa en la faja metalogénica de El Indio que en la zona de Los Pelambres. Esto último se constató mediante el estudio sistemático de imágenes Landsat que permitió distinguir dos corredores regionales (zonas de falla) de intensa fracturación: NW-SE y NNE-SSW (Oyarzun et al. 2006a, 2007b). El estudio geoestadístico de los datos mediante *kriging* puntual mostró que las anomalías geoquímicas regionales tienen un fuerte control regional NW-SE, acorde con una de las grandes zonas de falla mencionadas anteriormente. De esta manera se pudo apreciar que la geología estructural también constituye una importante herramienta de trabajo en los estudios minero-ambientales (Oyarzun et al., 2006a, 2007c)
- Dado que la acidez de la soluciones es la pieza clave para la lixiviación de los metales y metaloides, la litología del encajante controla parte del proceso. No es lo mismo una caliza (que tamponará las soluciones ácidas) que una roca ígnea, cuya posibilidad de subir el pH depende de la presencia abundante de feldespatos (reacciones 1-3) (Oyarzun et al., 2007c), lo cual nos lleva al tercer factor de riesgo.
- La alteración hidrotermal. Como expresamos en el punto anterior los feldespatos son la única barrera que existe entre una lixiviación masiva y una controlada. Las alteraciones de tipo potásica y propilítica (pórfidos cupríferos) mantendrán la mineralogía feldespática del encajante. Así, cuando comience la oxidación de la pirita, el ácido reaccionará con los feldespatos neutralizando las soluciones. Por el contrario, la alteración hidrotermal argílica avanzada (típica de los yacimientos epitermales de alta sulfurización) destruirá los feldespatos, y cuando la pirita comience su oxidación en el ambiente supergénico no habrá ningún mineral que pueda neutralizar efectivamente las soluciones. Esto favorecerá fuertemente la lixiviación de metales pesados y metaloides (reacciones 4-6) (Oyarzun et al., 2007c).

De esta manera, tenemos que entender los procesos de lixiviación y dispersión de metales y metaloides en el medio como un proceso complejo en el cual intervienen variables climáticas, fisiográficas y geológicas. La interacción entre estas variables está resumida en la siguiente figura.



Esquema idealizado de los procesos que controlan la dispersión de metales pesados y metaloides. Factores climáticos, fisiográficos, estructurales, de alteración hidrotermal y tipos de yacimientos emplazados en zonas de altura.

Sin embargo, de manera alguna debemos olvidar que la actividad minera contamina, y en ocasiones, mucho. Un hecho notable en este sentido queda demostrado por las anomalías geoquímicas de Andacollo y El Ingenio.



Fuentes de contaminación por metales pesados en Andacollo; a la izquierda, trapiche para la molienda de minerales y amalgamación de oro con mercurio; a la derecha, balsa abandonada en medio del pueblo.

Andacollo es un desastre ambiental en regla. Siglos de minería han creado una gran anomalía geoquímica de mercurio y cobre (Higueras et al., 2004c, 2005). La minería histórica del cobre (y oro) ha dejado además inmensas balsas de estériles

dentro del pueblo, el cual a su vez está al lado de las modernas explotaciones a cielo abierto de un pórfido cuprífero (Mina Carmen) y de epitermales de baja sulfurización de oro (Dayton). Estas últimas son (dentro de un margen) explotaciones "ambientalmente correctas". Otro caso notable de contaminación por cobre, y fenómenos masivos de drenaje ácido, lo proporciona la planta de tratamiento de minerales de cobre de Panulcillo, con efectos ambientales devastadores en el estero (río) de El Ingenio.

Hard rock mining was introduced at ***Andacollo*** *before the end of the 16th century. The main technological innovation was the introduction of the water powered "trapiches" (Spanish for mill), or rock crushers similar to those used for wheat grinding, consisting of two massive milling stones mounted vertically on a horizontal axle, which turned on top of a circular stone.*

An improved version of the old trapiches is presently used by the small-scale mining operations existing in the district. These modern, electricity-powered trapiches crush ore up to 10 cm in diameter, and leave a residue of 65% <200 mesh. The crushers are used for two purposes: (1) to crush ore for flotation of Cu sulfides; and (2) to recover Au (within the trapiche) on Cu plates which are covered by a thin film of Hg.

Higueras et al. (2004c)

5.2.7 Lecciones aprendidas

Los trabajos realizados en Chile entre 2002 y 2006 llaman a reflexionar sobre varios temas. El primero guarda relación con los hechos aislados, esos que pueden cambiar radicalmente la forma de ver las cosas. Por ejemplo, en nuestra opinión la clave para la consecución de los trabajos en las cuencas hidrográficas de la Región de Coquimbo está muy relacionada con la toma de una muestra aislada en la cuenca del Elqui, que ni tan siquiera era de sedimento fluvial activo. Para un trabajo que se basaba estrictamente en el muestreo de sedimentos fluviales, esto debería llamar la atención sobre las metodologías de campo. Nos referimos a la muestra de la secuencia lacustre colgada en el valle del río Turbio (HLS). Su carácter rico en arsénico, junto con su edad (unos 10.000 años), mostraron que las relaciones yacimientos minerales – minería – contaminación por metales pesados y metaloides pueden ser mucho más complejas que lo que a primera vista parece. Otra enseñanza que se deriva de esa muestra, es que el geólogo ambiental debe trabajar en el campo con una perspectiva amplia, con "curiosidad" sobre todo lo que rodea el ámbito de trabajo. El estudio de una cuenca fluvial es mucho más que coger unas cuantas muestras y luego analizarlas por otros cuantos elementos químicos. Eso puede hacerlo cualquiera. El geólogo tiene que ir más allá del mero muestreo, y considerar todas las variables que pueden estar implicadas en el estudio.

De cualquier manera, la muestra de la secuencia holocena cambio nuestra visión sobre la cuenca del Elqui y nos trasladó de un presente estrictamente minero-ambiental a otro más geológico, que se remontaba al comienzo de un calentamiento global (término que hoy asusta tanto a la sociedad) que permitiría que el clima y la fisiografía de la región cambiaran radicalmente. La subida de las temperaturas durante el Holoceno permitió las lluvias y por lo tanto la erosión

masiva de los cuerpos mineralizados del yacimiento de El Indio. Con dicha erosión vino la oxidación de la mineralización sulfurada y la lixiviación masiva de cobre y arsénico.

Había que comprobar si estas lecciones recién aprendidas tenían validez en las cuencas del sur, nos referimos a las del Limarí y Choapa, aunque las sorpresas no acabarían. La primera vino acompañada nuevamente de una premisa falsa: no había minas en la zona cordillerana de la cuenca del Limarí, ni siquiera un yacimiento reconocido como tal. Por lo tanto, no deberíamos encontrar fuertes anomalías en metales pesados. Sólo había zonas de alteración hidrotermal en la cordillera, y como habíamos comprobado en la cuenca del Elqui, la presencia de alteraciones no era suficiente para que se desarrollara una fuerte contaminación. Craso error, no había yacimientos pero si un prospecto, y si había un prospecto, era potencialmente factible que hubiera fuertes anomalías geoquímicas. Después de todo, no se eleva una zona de alteración hidrotermal a la categoría de prospecto si ésta no tiene el potencial para convertirse en una zona explotable. Investigar la actividad de exploración antes de ponerse a trabajar en una zona. Esa es la clave, por difícil que sea recabar los datos pertinentes.

La cuenca del Choapa proporcionó una última lección magistral. La explotación del pórfido cuprífero de Los Pelambres es a gran escala, con extracción de unas 300.000 toneladas/día y una producción anual del orden de 340.000 toneladas de concentrado de cobre. Esta producción parecía lo suficientemente grande como para dejar una marcada huella geoquímica en la cuenca del Choapa. No fue así, y como pudimos deducir durante la investigación, una serie factores mineralógicos y estructurales mitigan fuertemente los procesos de lixiviación y transporte de metales. No queremos decir con esto que no exista contaminación asociada a Los Pelambres, la hay, pero es de menor escala (anomalía geoquímica del río Cuncumén) comparada con las de El Indio o Coipita.

5.2.8 Sobre porqué 5 es mejor que 30

Otra reflexión guarda relación con el equipo de trabajo y sus premisas. Aunque parezca una paradoja, si hubiéramos dispuesto de grandes fondos y se hubieran prefijado las líneas de investigación antes de empezar, es muy probable que no se hubiera hecho ni la mitad. Fue justamente la carencia de una organización rígida lo que dio flexibilidad al equipo como para plantearse y replantearse el cómo, cuándo y por qué hacer las cosas.

Es más fácil moverse y poner de acuerdo “a 5 que a 30”. En este sentido resulta curioso que el número de investigadores (mientras más “mejor”) sea considerado

como un factor de peso en la concesión de proyectos, y que se "premie" el tener las cosas muy claras "antes" de empezar.



A veces grandes números de personas solo complican y enredan las cosas (imagen[9]). Una cosa es disponer de 15 personas para arrastrar un bloque de granito y otra ponerse a discutir entre los 15 sobre el cómo hacerlo.

Al respecto, resulta sorprendente (por decir lo menos) que en los impresos de algunas convocatorias de proyectos se pregunte a los investigadores cosas tales como: cuales serán los resultados esperados del proyecto (¿si sabemos lo que vamos a encontrar para que molestarse y gastar dinero en buscarlo?), o en que revistas se publicarán los resultados de dicho proyecto (¿qué tiene que ver esto con la ciencia?). Es la torpeza ya institucionalizada (en ausencia de pensamiento científico) de confundir el medio de divulgación con la calidad de los resultados de una investigación.

Esto es lo que se podría llamar "la ciencia urbanizada", que discurre por "asfaltadas carreteras" planificadas por las autoridades del sistema. En nuestra opinión "flexibilidad" es la palabra clave. Un equipo sujeto a controles rígidos periódicos no puede hacer ciencia. La ciencia surge de la libertad de pensamiento, los controles burocráticos atentan contra esta.

5.2.9 Palabras finales: el "geólogo ambiental" versus el "ambientalista"

El tema ambiental ha ganado importancia de manera progresiva en la geología, tanto en la enseñanza como en la investigación teórica y aplicada. Aunque los aspectos más triviales de los problemas ambientales suelen a veces llamar de manera importante la atención de la opinión pública, existen otros, "de fondo", que imprescindiblemente deben ser tratados.



La geología ambiental, incluyendo sus ramas de geoquímica y mineralogía ambiental necesita "geólogos" que puedan entender los problemas ambientales de una manera integral, no "ambientalistas" con ciertos conocimientos de geología. Los problemas minero-ambientales son serios y complejos, de ahí que quien trabaje en estos (y como hemos visto en esta sección), deberá poseer sólidos conocimientos en una diversidad de campos de la geología (imagen[10]).

Muchos países registran una historia minera y metalúrgica que se extiende de manera importante en el tiempo. Décadas, incluso siglos de minería, han dejado un legado a veces oculto, de escombreras, balsas de mineral y otros residuos de origen minero que constituyen *de facto* potenciales bombas químicas de relojería. La carga mineral que no se explotó en su momento está sometida a procesos químicos naturales (oxidación, hidrólisis) que actúan sobre dichos minerales, contribuyendo a su disolución y por lo tanto, a la liberación de metales pesados. Los metales puestos en solución pasan directamente a los suelos, pueden alcanzar por infiltración las aguas subterráneas, o continuar a través de los cursos fluviales, ampliándose considerablemente el área afectada y los riesgos potenciales para el medioambiente y la salud humana. Ejemplos de esta

naturaleza no hay que buscarlos necesariamente en remotas regiones del mundo, ya que en España existen también abundantes ejemplos, incluso en las inmediaciones de ciudades y/o explotaciones agrícolas. Cómo y porqué se permiten estas cosas: buena pregunta.



Balsa y otros residuos abandonados ricos en Pb, Zn y As en el Distrito Minero de Mazarrón, Murcia (España).

Obviamente, los peligros ambientales derivados de la minería no se circunscriben al legado minero de un país, sino que se extienden de manera incluso más importante al presente y se proyectan con fuerza en el futuro. Esto es debido a que la minería continúa y continuará siendo un factor importante en la economía de muchos países del mundo y sobre todo, porque la sociedad sigue necesitando (y cada vez más) los productos de la minería.

Para abordar estos problemas hace falta que los encargados de investigar lo hagan con una visión amplia de la geología. La geoquímica y la mineralogía son importantes herramientas ambientales, pero ninguna puede *per se* responder las múltiples interrogantes que surgen durante una investigación de campo. En otras palabras, los estudios minero-ambientales no pueden estar (exclusivamente) en manos de geoquímicos o mineralogistas. Tienen que estar controlados por "geólogos", profesionales que vayan más allá del uso de una "palita" para la toma de muestras de suelos o sedimentos y del posterior estudio, más o menos aristocrático, de los datos mediante sofisticados procedimientos analíticos y

matemáticos. Pensamos que el estudio de las cuencas del Elqui, Limarí y Choapa ilustra este principio básico.

Para finalizar quisiéramos sugerir las características que debería tener un geólogo que trabaja en temas minero-ambientales. Así, el experto en recursos minerales y medioambiente debería ser capaz de:

- Comprender la naturaleza "geológica" (integral) de los recursos minerales, tanto a la escala local como a la regional.
- Comprender el potencial contaminante que poseen los yacimientos minerales y el papel que puede jugar su encajante.
- Comprender los principales métodos de explotación minera y procesos metalúrgicos.
- Comprender los procesos de traspaso geoquímico de metales y metaloides a la atmósfera, suelos, aguas y biota.
- En función de lo anterior evaluar los riesgos potenciales que se derivan de los yacimientos minerales y explotaciones mineras en activo o abandonadas.
- Por último, debe ser capaz de proponer soluciones ambientales acordes a cada caso concreto: previniendo riesgos y estableciendo normas para la restauración y remediación.

5.3 Cuando preservar un "desastre" podría ser (muy) educativo

5.3.1 Introducción

Recientemente López García et al. (2011) llamaron la atención sobre la necesidad de preservar para la posteridad antiguos sitios mineros en el sureste de España. Esta sección resume las principales ideas planteadas en ese trabajo.

> ***El patrimonio geológico es un bien común**: es parte de la riqueza natural de nuestro Planeta. La destrucción de los lugares de interés geológico es casi siempre irreversible, y deja a las generaciones futuras sin la posibilidad de su conocimiento y disfrute, por lo que la prevención y la planificación son fundamentales.*
>
> *Para gestionar este valioso patrimonio geológico es fundamental conocer su ubicación y características. Por ello, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y diversas autonomías, diputaciones, ayuntamientos así como centros de investigación vienen realizando inventarios y valoraciones de Lugares de Interés Geológico, LIGs, o Puntos de Interés Geológico, PIGs, ya sea a escala nacional, autonómica, provincial o local, a la vez que se plantean medidas de gestión en función de su vulnerabilidad y características.*
>
> *Sociedad Geológica de España (2011)*

Los antiguos sitios mineros, si fueron lo suficientemente importantes, pueden obtener el estatus de "patrimonio cultural" o "patrimonio histórico". Sin embargo, sería difícil encontrar unos pocos bajo consideración para el estatus de "patrimonio geológico" (*geoheritage site*). Teniendo en cuenta el enorme valor educativo de muchas antiguas minas y distritos, esta situación resulta algo curiosa.

Dado que en muchas ocasiones se percibe la actividad minera como algo "ambientalmente perverso", cabría recordar que la humanidad ha llevado a cabo actividades mineras durante miles de años, primero para obtener piedras para actividades fundamentales como la caza (p.ej., puntas de flecha de obsidiana), o para pintar en las cuevas y paredes de roca (por ejemplo, el ocre de la goethita). Con el pasar del tiempo y el advenimiento de la metalurgia la humanidad empezó a extraer metales a partir de minerales (p.ej., cobre de la malaquita). No hay manera de describir en pocas palabras cuán importante ha sido y sigue siendo la minería para nosotros: se encuentra en la base de la tecnología y constituye una pieza clave de nuestro actual sistema de vida.

Sin embargo, si la minería es "tan" importante para la sociedad ¿por qué las minas se mantienen apartadas del concepto de patrimonio geológico? Tal vez las raíces de esta política puedan encontrase en planteamientos "fundamentalistas" como los de Sharples (2002), quien plantea que el estatus de patrimonio geológico se debería reservar para aquellos sitios donde no ha habido el propósito de agotar los recursos geológicos, lo que habría llevado a una pérdida de sus valores intrínsecos o ecológicos. Tampoco deberían alcanzar ese estatus (en la visión de ese autor) los sitios donde ha habido remoción, procesado o manipulación de las rocas. La última idea es lapidaria y deja la minería, obviamente, fuera de toda consideración.

Así, solo aquellos sitios de una singular belleza geológica, de carácter prístino, podrían llegar a obtener el estatus de patrimonio geológico.

De alguna forma estas ideas también se encuentran presentes en la definición de patrimonio geológico de la Sociedad Geológica de España (2011), que habla de riqueza "natural" que no debe ser "destruida". Desde luego aquí nos encontramos con varios elementos de la cultura postmoderna que tanto empapan actualmente los foros sociales. Al respecto, Oyarzún y Oyarzun (2011) señalan que uno de los paradigmas que afloran a menudo en los planteamientos de los grupos ambientalistas se refiere a la actitud ante lo "natural" (supuestamente bueno) y lo "artificial" (considerado como maligno o peligroso). Así, se contempla un lago como algo "bueno" mientras que un embalse es "malo o peligroso".



Tesoros geológicos revelados por la actividad minera subterránea. Vista de los cristales gigantes de yeso (selenita) de la mina de Pb-Zn de Naica en México (García-Ruiz et al. 2007). Fotografía: Javier Trueba – Madrid Scientific Films.

Al respecto uno debiera hacerse la siguiente pregunta: ¿y qué sucede si durante las operaciones de extracción o después de que la minería ha cesado aparecen los afloramientos más impresionantes que uno pudiera soñar, conteniendo los minerales o estructuras más espectaculares? ¿Es este un pensamiento delirante? No, en absoluto, casos así pueden ser raros pero no imposibles. Por ejemplo, tomemos el caso de la mina de plomo y plata de Naica en México, donde los

trabajos de exploración revelaron la existencia de cristales gigantes de yeso transparente de hasta 11 m de longitud (García-Ruiz et al., 2007). ¿Qué hacemos con un tesoro como éste? ¿Negamos a la mina Naica la categoría de patrimonio geológico ya que los cristales gigantes se encuentran en el interior de una mina subterránea, esto es, en una estructura "no-natural"? Y esta no es una rareza "singular", ya que un hallazgo similar se registró en la gigantesca mina de El Teniente en Chile, donde también se encontraron cristales de yeso de 6 m de largo x 1,5 m de ancho, en cavidades formadas dentro de una gran diatrema (Formación Braden) (Camus, 1975).

Así, las minas son "algo más" que lugares donde el estado primigenio de la naturaleza ha sido alterado. Por otra parte, aparte de consideraciones económicas y sociales, las minas juegan otro papel fundamental, revelan objetos geológicos que en circunstancias normales no se verían. En este sentido, uno puede considerar las minas como "un problema" o "una oportunidad". A continuación examinaremos ambas visiones a través del estudio de dos ejemplos en el sureste de España: los distritos mineros de Mazarrón y La Unión.

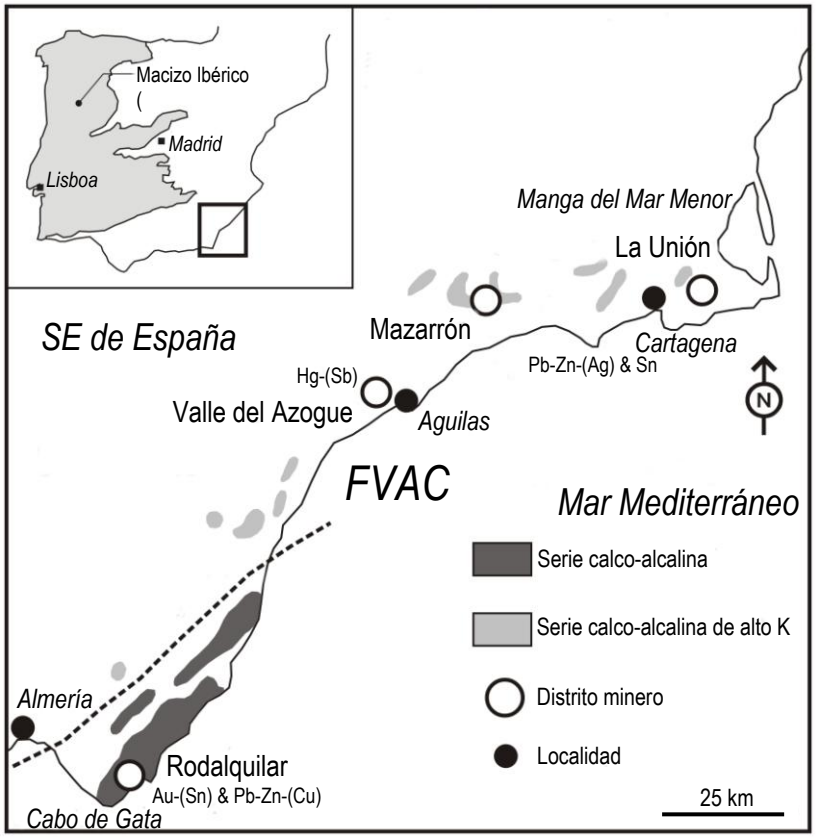
5.3.2 Escenarios geológicos inusuales y distritos mineros

La geología del sureste de España (Almería y Murcia) se caracteriza por la presencia de dos de los complejos Alpinos más importantes de España: Nevado Filábride y Alpujárride. Estas unidades fueron intensamente plegadas y emplazadas tectónicamente a finales del Oligoceno – comienzos del Mioceno, sufriendo más tarde un colapso extensional a través de *detachments* extensionales en el Mioceno Medio-Superior (Doblas y Oyarzun, 1989; Platt y Vissers, 1989). Este episodio fue acompañado por un importante vulcanismo calco-alcalino, calco-alcalino de alto potasio y shoshonítico (andesitas, dacitas, riolitas) a lo largo de la Faja Volcánica de Almería - Cartagena (FVAC), mientras que la sedimentación tuvo lugar dentro de cuencas sedimentarias marinas, que coexistieron espacialmente en algunos casos con el vulcanismo.

Lo notable de esta zona de España recae en varios aspectos geológicos y metalogénicos (Oyarzun et al., 1995):

- La presencia de tres series magmáticas en un espacio extremadamente pequeño definido por la FVAC: ~ 160 x 20 km entre las localidades de Almería (Almería) y La Manga del Mar Menor (Murcia).
- La presencia de una variedad inusual de yacimientos minerales, incluyendo oro en Rodalquilar (Cabo de Gata), Hg en el Valle del Azogue (Águilas), Pb-(Ag)-Zn (Distrito de Mazarrón), y Pb-(Ag)-Zn y Sn en la Sierra de Cartagena (Distrito de La Unión).

Podemos encontrar un escenario equivalente metalogénico y volcánico en los Andes de Chile, Perú y Bolivia, pero en este caso se trata de fenómenos desarrollados a una escala inmensamente mayor (Oyarzun et al. 1995). Por otra parte, mientras que la actividad volcánica andina estuvo y está relacionado con la subducción de la placa de Nazca (y antes la de Farallon), en el sureste de España el magmatismo y la actividad metalogénica se relacionó con un colapso extensional del orógeno alpino en ausencia de subducción activa (Doblas y Oyarzun, 1989; Oyarzún et al., 1995; Benito et al., 1999).



Series magmáticas a lo largo de la FVAC, distritos mineros más importantes y sus principales componentes de mineralización. Adaptada de López García et al. (2011).

El Distrito Minero de Mazarrón (Rodríguez e Hidalgo, 1997; Manteca Martínez et al., 2005; López García et al., 2011) constituye uno de los más importantes sitios de interés geológico y minero de España, y junto con los distritos de La Unión y Rodalquilar, constituye un extraordinario ejemplo de la relación entre el vulcanismo mioceno del sureste peninsular y los procesos metalogénicos.

La zona de Mazarrón presenta un típico clima mediterráneo con veranos secos y moderación de las temperaturas por la influencia del Mar Mediterráneo. Las precipitaciones varían mucho de un año a otro y están en el rango de 185 a 310 mm, mientras que las temperaturas medias anuales son del orden de 16,5-18,8ºC. Los elementos fisiográficos más relevantes son tres sierras con altitudes máximas

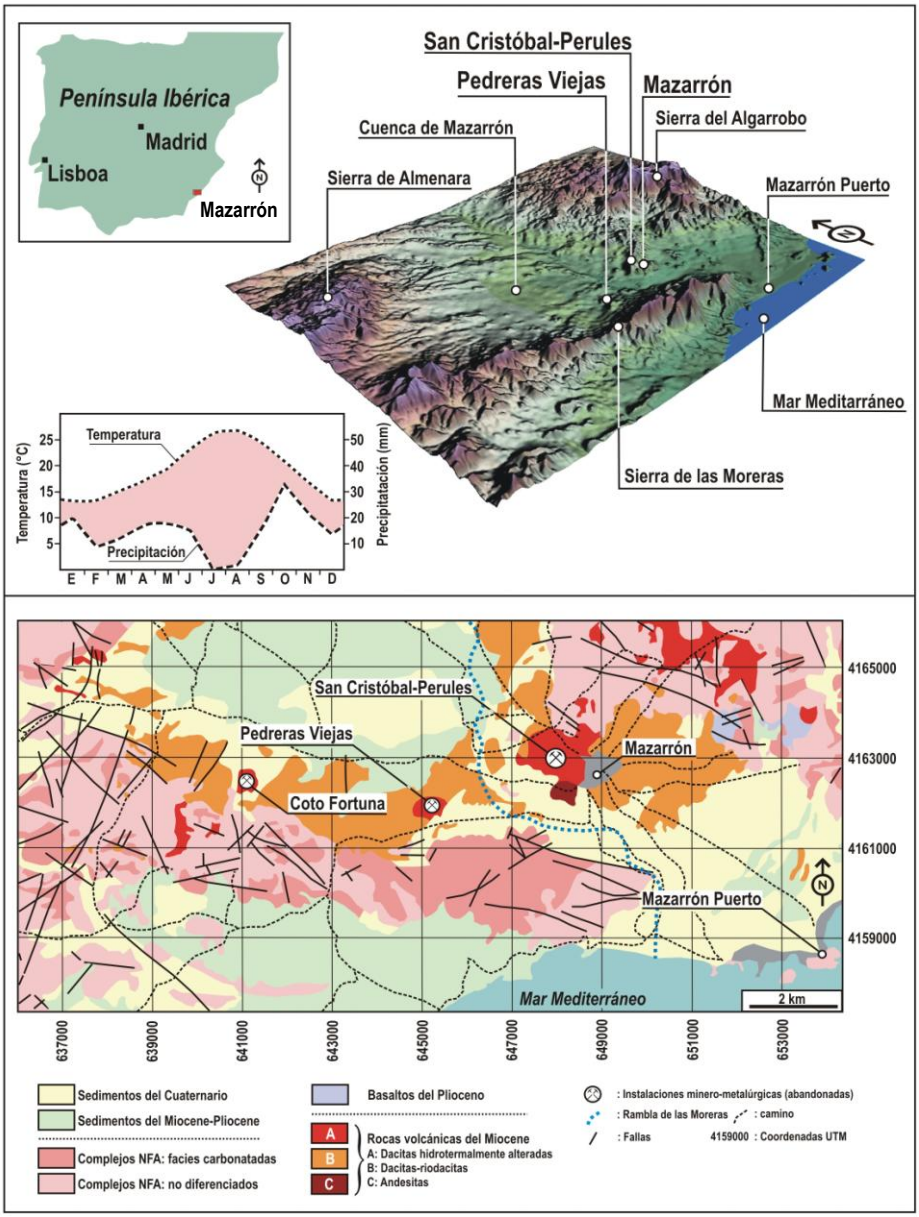
de 400 a 700 m que limitan la cuenca de Mazarrón por el sur (Sierra de las Moreras), oeste (Sierra de Almenara) y este (Sierra del Algarrobo). Las sierras definen una cuenca (Cuenca de Mazarrón) con forma de herradura abierta hacia el norte e inclinada hacia el sur.

Una visita al Distrito Minero de Mazarrón permite remontarnos en el tiempo a una minería que alcanzó su apogeo a fines del Siglo XIX - comienzos del Siglo XX. No obstante, la historia minera de Mazarrón se extiende más allá de estas fechas, comenzando en el Siglo II A.C. durante la expansión de Roma. Posteriormente durante los Siglos XV y XVI se llevó a cabo la explotación de los depósitos de alumbre de la zona. Sin embargo, el desarrollo moderno de Mazarrón no llegó hasta fines del siglo XIX cuando se instalaron allí dos compañías mineras: Unión, constituida en Madrid en 1883, y Aguilas, fundada en 1884 con capitales franceses. Hacia los años 1960s, toda actividad minera cesó definitivamente. La minería en Mazarrón fue principalmente subterránea y los pozos y galerías alcanzaron profundidades de hasta 500 m (San Cristóbal - Perules).

El marco geológico del distrito incluye un basamento caracterizado por la presencia de los complejos Nevado Filábride y Alpujárride, sobre los que se disponen rocas sedimentarias y volcánicas del Mioceno y Plioceno. Las rocas volcánicas del Mioceno forman una curiosa estructura en herradura abierta hacia el NNE. Las unidades volcánicas incluyen mayoritariamente rocas dacíticas con andesitas subordinadas. Las primeras poseen en parte estructura fluidal, aunque los cuerpos más relevantes bajo el punto de vista metalogénico y minero son los domos mineralizados dacíticos, muy alterados, que afloran en tres localidades en el sector sur de la estructura en herradura (Coto Fortuna, Pedreras Viejas, San Cristóbal-Perules).



El sector de San Cristóbal — Perules del Distrito de Mazarrón, tal como se observa desde la entrada al complejo minero. Los residuos de las antiguas actividades minero-metalúrgicas son conspicuos en todo el sector.



El Distrito Minero de Mazarrón. Arriba, localización, datos ambientales y DEM de la zona; abajo mapa geológico del distrito mostrando las tres zonas mineras: San Cristóbal-Perules, Pedreras Viejas y Coto Fortuna. Adaptada de Oyarzun et al. (2011).

La mineralización metálica consiste en filones y *stockworks*, y los principales minerales son pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS) y galena (PbS) argentífera (15-20% Ag). Otros sulfuros incluyen calcopirita ($CuFeS_2$), tetraedrita-tenantita $(Cu,Fe,Ag,Zn)_{12}(Sb.As)S_{13}$, arsenopirita (FeAsS), cinabrio (HgS), estibina (Sb_2S_3) y berthierita ($FeSb_2S_4$). Minerales secundarios incluyen cerusita ($PbCO_3$), anglesita ($PbSO_4$), smithsonita ($ZnCO_3$), azurita ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$) y malaquita ($Cu_2CO_3(OH)_2$), mientras que la ganga consiste en cuarzo (SiO_2), calcita ($CaCO_3$), siderita ($FeCO_3$), dolomita ($MgCO_3$) y yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). El intenso recubrimiento de limonitas está caracterizado por la presencia de goethita (FeOOH) y jarosita

($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) Las reservas son del orden de 11 Mt al 2,59% Zn, 0,57% Pb y 16,6 g t^{-1} Ag (Rodríguez e Hidalgo, 1997).

El Distrito Minero de la Unión (Manteca Martínez y Ovejero Zapino, 1992; López García et al., 2011) es uno de los sitios de interés geológico y minero más importantes de España, constituyendo un extraordinario ejemplo de la relación entre el magmatismo mioceno del sureste de España, la tectónica y los procesos metalogénicos. El distrito de La Unión ocupa una superficie de unos 10 x 5 km y encierra la mayor concentración de mineralizaciones de Pb-Zn de las Béticas (y una de las mayores de España). El clima de la zona se describe como mediterráneo árido o semiárido. La posición marítima suaviza las temperaturas, si bien las precipitaciones rara vez superan los 300 mm anuales, encontrándonos en una de las zonas más áridas del país. La temperatura media anual ronda los 20ºC (12ºC en Enero y 28ºC en Agosto).

La Sierra de Cartagena (o "Sierra Minera") donde se emplaza el distrito es una formación montañosa que se extiende en dirección Este-Oeste a lo largo de unos 25 km de costa entre la ciudad de Cartagena y el Cabo de Palos. Su máxima elevación se encuentra en el cerro Sancti Spiritus (431 m de altitud) en las cercanías de Portman. En tiempos antiguos la sierra fue intensamente explotada por sus yacimientos de plomo y plata. El control sobre estos recursos mineros fue una de las principales causas del establecimiento de los cartagineses y la posterior ocupación romana.

THE TRACES OF PAST: The Sierra Minera

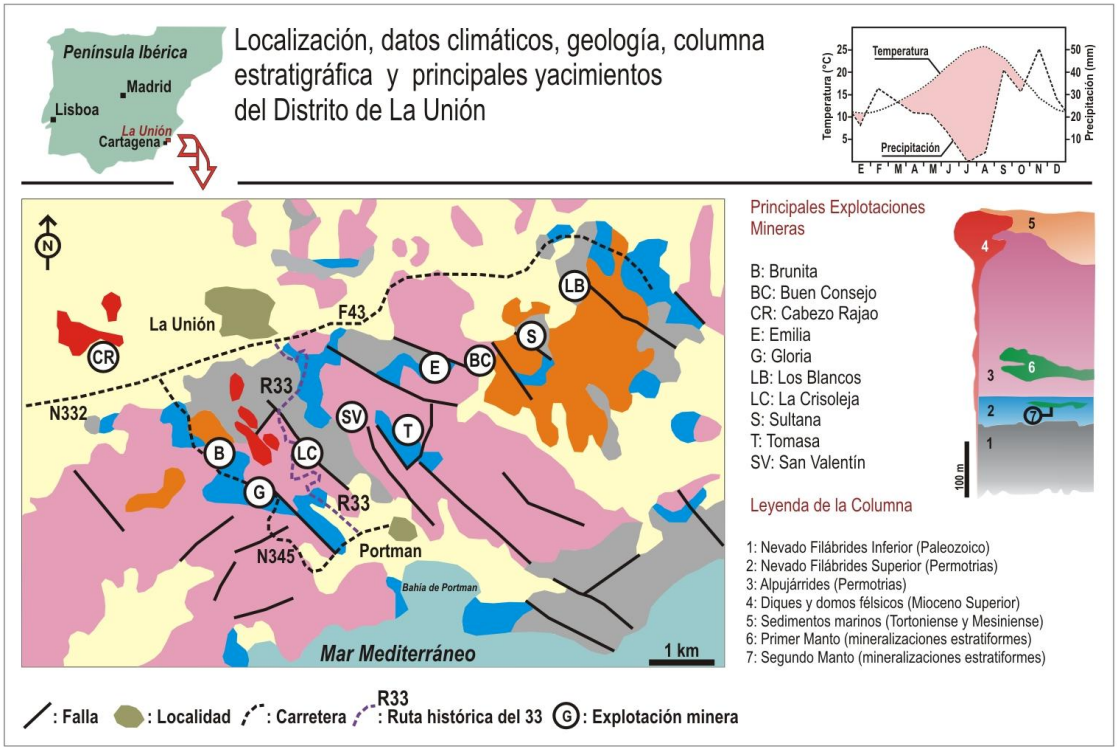
… The mining activity gave birth to a peculiar and unique landscape, which is full of rich and diverse remains from those periods, a cultural and environmental heritage which makes the whole area of the Sierra Minera, an open-air museum. Its importance and singularity have made all remains to be declared listed buildings with the category of Historical Site. A place that is really worth a visit through the different museums and visitors centers, to understand and enjoy the valuable cultural, natural and intangible heritage.

UTE Fundación Sierra Minera y Restauralia Cartago (2011)

La minería resurge en la segunda mitad del Siglo XIX, llegando el distrito a ser uno de los principales productores mundiales de Pb-Zn. Después de la Guerra Civil (1936-1939) se pasó a una explotación extensiva a cielo abierto, que generó graves problemas ambientales hasta el cese definitivo de la actividad minera en 1991. El paisaje de la Sierra de Cartagena está marcado y transformado por siglos de intensa actividad humana y atesora valiosos monumentos arqueológicos e industriales de su pasado minero.

La Sierra de Cartagena se inserta en el Dominio Interno del Orógeno Bético. Se caracteriza por estar formada por un basamento constituido por los complejos de Nevado Filábride (Precámbrico/Paleozoico a Triásico) y Alpujárride (Pérmico a Triásico) en una serie de mantos de cabalgamiento superpuestos de edad alpina y tardialpina. Durante el Triásico Superior o Jurásico se desarrolló un magmatismo

básico que se emplazó como *sills* en las unidades del basamento. Durante el Mioceno Superior el edificio orogénico colapsó gravitacionalmente de manera progresiva, fenómeno que fue acompañado de: 1) un importante vulcanismo calcoalcalino alto K intermedio a félsico (andesitas, dacitas, riodacitas); y 2) facies sedimentarias marinas que cubrieron parcialmente las unidades del basamento. Es en asociación con este vulcanismo Mioceno que se formaron las diferentes mineralizaciones de la Sierra de Cartagena.



El Distrito Minero de La Unión (Cartagena). Geología basada en Manteca Martínez y Ovejero Zapino (1992). Adaptada de López García et al. (2011).

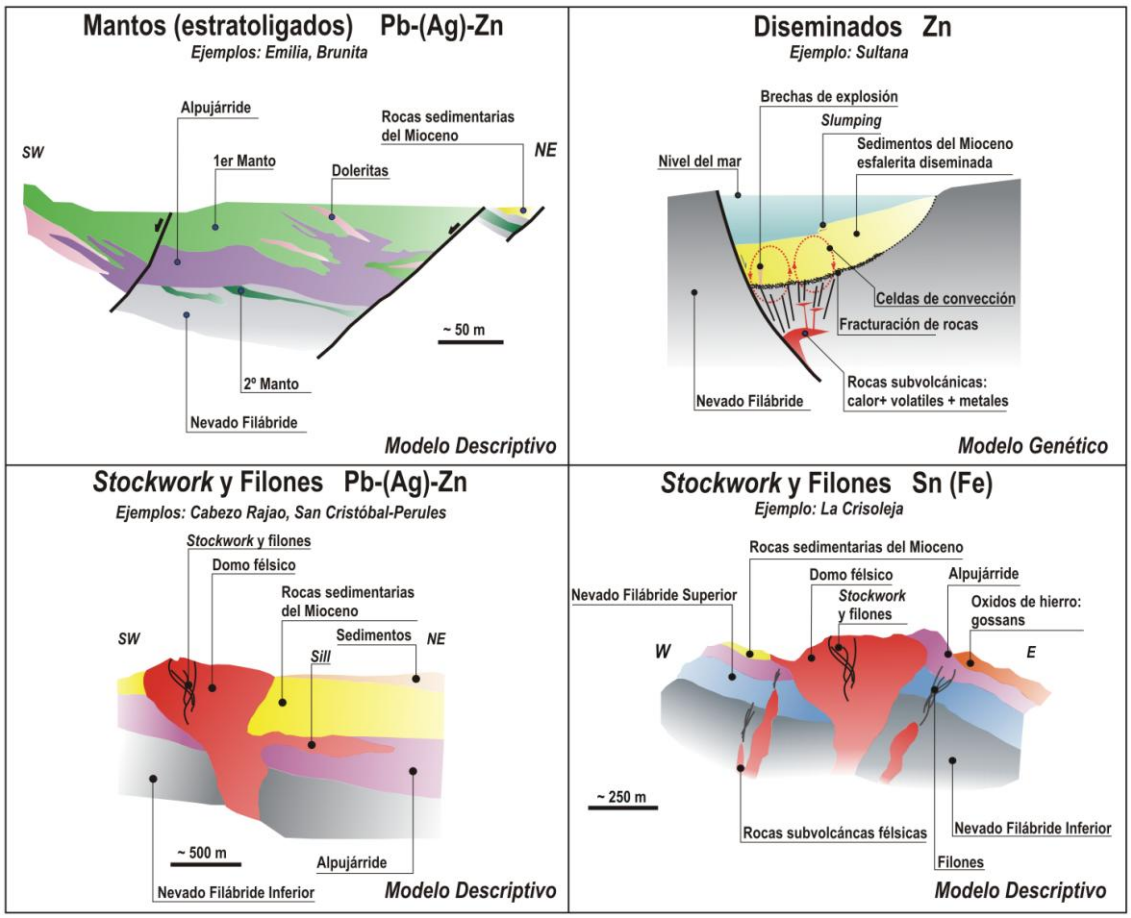
Las mineralizaciones son de tipos variados y desde un punto de vista morfológico se distinguen las siguientes variedades:

1. *Mantos*: son mineralizaciones estratiformes seudoconcordantes con las unidades Nevado Filábrides (2º Manto) y Alpujárrides (1er Manto). En ambos mantos se pueden encontrar dos paragénesis minerales distintas: a) greenalita – magnetita – sulfuros – carbonatos – sílice; y b) clorita – sulfuros – carbonatos – sílice. Las mineralizaciones tipo manto son las que han aportado la mayor parte de los metales extraídos en el distrito.

2. *Diseminaciones en el Mioceno marino*: Se reconocen de preferencia en Corta Sultana, donde forman cuerpos irregulares en los conglomerados y margas del Mioceno. Se trata de mineralizaciones principalmente de esfalerita con pirita, marcasita y galena.

3. *Filones*: se desarrollan principalmente en las zonas de confluencia de fallas, y han tenido escasa importancia económica en la sierra.
4. *Stockworks y filones en aparatos dómicos*: se reconocen en el Cabezo Rajao y La Crisoleja. Son mineralizaciones de estructura compleja que conforman morfologías tipo *stockwork* con filones principales y menores ramificados, que se interceptan. Aunque en el Cabezo Rajao la mineralización es clásicamente del tipo Pb-Zn, en la Crisoleja la paragénesis incluye una mineralogía especial rica en estaño y otros óxidos.

5. *Zonas de oxidación*: Las mineralizaciones emplazadas próximas a la superficie han sufrido un proceso de oxidación dando lugar a la formación de monteras (gossans), con una mineralogía variada de óxidos, sulfatos y a veces elementos nativos como plata y cobre.



Principales tipos de yacimientos en los Distritos Minero de La Unión y Mazarrón. Adaptada de López García et al. (2011).

5.3.3 Mazarrón y La Unión: valores educativos y sociales

Sharples (2002) sugiere que los sitios designados como patrimonio geológico deben poseer un valor para los seres humanos, proporcionando evidencia científica de la evolución pasada de la Tierra, constituyendo sitios de importancia para la investigación, la educación, y las actividades recreativas como el turismo. Aparte de eso, deberían ser lugares que han contribuido a crear un sentido de pertenencia, de hogar a determinadas comunidades humanas. En este sentido, creemos que escenarios geológicos como los de Mazarrón y La Unión cumplen con estas condiciones.

El cante de las minas

Con la apertura de yacimientos mineros en el siglo XIX en la sierra de Cartagena-La Unión, miles de obreros andaluces, especialmente de las provincias de Granada y Almería, emigraron a Cartagena y La Unión para trabajar en las minas. Con ellos llegó también a la zona el cante flamenco.

De la malagueña, la granaína y el taranto de Almería, palos herederos del fandango, traídos por los obreros andaluces y su contacto con los fandangos locales, surgieron los denominados cantes de Levante …

… El Festival Internacional del Cante de las Minas, que se celebra cada año en La Unión (Región de Murcia), España. Durante el mes de agosto, nació y sigue siendo hoy día la memoria flamenca de su legendaria minería. Aquellos cantes, que sufridamente alzaban los antepasados mineros durante su largo día de trabajo dentro de la mina, se conmemoran ahora, para no perder su valiosa tradición, durante la celebración de este certamen …

Wikipedia (2011b)

Ambos distritos se encuentran dentro de una región con una historia geológica única en materia del estudio de:

1. La construcción y el colapso final de un orógeno alpino (Orógeno Bético).
2. Una actividad volcánica que dio lugar a la generación de las series calcoalcalina, calcoalcalina de alto K e incluso shoshonítica, todo esto en un espacio extremadamente reducido en el espacio y el tiempo.
3. El desarrollo de diferentes estilos de actividad hidrotermal que finalmente condujeron a la formación de un gran número de yacimientos de minerales con paragénesis poco comunes. Por ejemplo, la asociación de greenalita-magnetita con minerales de Pb-Zn en los yacimientos de tipo manto de La Unión constituye un caso extremadamente inusual a escala mundial.
4. La gran variedad de tipos de yacimientos minerales, desde *stockworks* y filones, hasta diseminaciones y mantos.

Debido a estas razones, los distritos de Mazarrón y la Unión son lugares privilegiados para la investigación y la educación, y han proporcionado el perfecto escenario geológico-metalogénico para numerosos trabajos de investigación y tesis doctorales. Además, cada año estos distritos atraen a profesores y estudiantes de ciencias geológicas de España y otros países europeos.

En términos de importancia recreativa y turismo, hay que destacar la actividad del Consorcio Turístico de la Sierra Minera (formado por la Comunidad Autónoma de Murcia y las ciudades de Cartagena y La Unión), que lleva a cabo acciones para mejorar las condiciones ambientales a la vez que preserva el patrimonio minero. El Consorcio ha desarrollado importantes proyectos de preservación del patrimonio, como los de Cueva Victoria, la Ruta del 33, y el Museo de las Minas de La Unión.



El Cabezo Rajao, dos vistas complementarias. A la izquierda, desde la Ruta del 33; a la derecha, desde el camino de acceso.

Por último, respecto a los "paisajes" de Sharples (2002) que han contribuido a la sensación de hogar a determinadas comunidades humanas, digamos aquí que no hay otro colectivo en el mundo que se sienta más emocionalmente ligado a su entorno que los mineros. Esta tradición se mantiene fuerte en La Unión, donde desde hace cincuenta años se desarrolla anualmente un gran festival musical del llamado *Cante de las Minas*, que representa una parte importante de la historia del flamenco y de la tradición minera.



El pueblo de La Unión (Cartagena, Murcia). En primer plano, una balsa (relave). Imagen tomada desde el camino de la Ruta del 33.

5.3.4 Pros y contras ambientales

A pesar de los incuestionables valores educativos y sociales de Mazarrón y La Unión, hay otros aspectos no menos importantes que deben ser analizados y tenidos en cuenta. La minería, como la mayoría de las actividades que el hombre realiza para su sustento y desarrollo crea perturbaciones en el medio natural, que van desde lo imperceptible a los impactos notables.



Alumnos de geología de Madrid recibiendo conocimientos de campo sobre geología, yacimientos minerales y minería en Corta Emilia (izquierda) y el Cabezo Rajao (derecha).

Esto nos lleva a recordar la definición de impacto ambiental de una actividad, como "la diferencia en el medioambiente que existe entre el momento en que empieza la actividad, cuando la actividad se lleva a cabo, y sobre todo, cuando acaba". Este es un asunto que aunque hace años no era percibido como un factor de importancia, ahora es observado con gran preocupación. Por lo tanto en la actualidad hay reglas muy estrictas sobre el impacto de las operaciones mineras, que incluyen regulaciones sobre la emisión de residuos líquidos, las emisiones de polvo, gases, ruidos, la restauración del paisaje, etc.

Con respecto a los distritos mineros de Mazarrón y La Unión, existen una serie de problemas ambientales y los más relevantes son los siguientes (Robles-Arenas et al., 2006; Oyarzun et al., 2011):

1. Áreas importantes cubiertas por residuos de las plantas de tratamiento de minerales. Estas áreas tienen un impacto visual significativo y un potencial para la lixiviación de metales pesados.
2. Balsas (*relaves*) derivados de la flotación de sulfuros. Estos residuos son ricos en metales pesados, como el plomo y el zinc (entre otros), y siendo ricos en pirita tienen el potencial para el desarrollo de lixiviación ácida de los metales. Debido al tamaño de las partículas pequeñas y los patrones de viento en la zona, los residuos también pueden inducir contaminación atmosférica.

3. Las minas abandonadas a cielo abierto. Algunas de estas han sido reutilizadas para el almacenamiento de residuos mineros, a veces con resultados desastrosos (como en la Corta Tomasa del Distrito de La Unión).
4. La formación de drenaje ácido en algunos de los sitios mineros abandonados, como Brunita (La Unión) y San Cristóbal – Perules (Mazarrón).
5. Edificios abandonados, algunos en condiciones ruinosas.
6. Las actividades agrícolas llevadas a cabo en algunas zonas adyacentes a operaciones mineras abandonadas, como en las proximidades de Cabezo Rajao (Cartagena - La Unión) y San Cristóbal-Perules (Mazarrón).



Residuos minero-metalúrgicos abandonados en Mazarrón (izquierda) y La Unión (derecha).



Corta Tomasa, donde se vertieron de manera torpe colas de una planta de flotación. Estas migraron en profundidad por las fracturas del yacimiento.

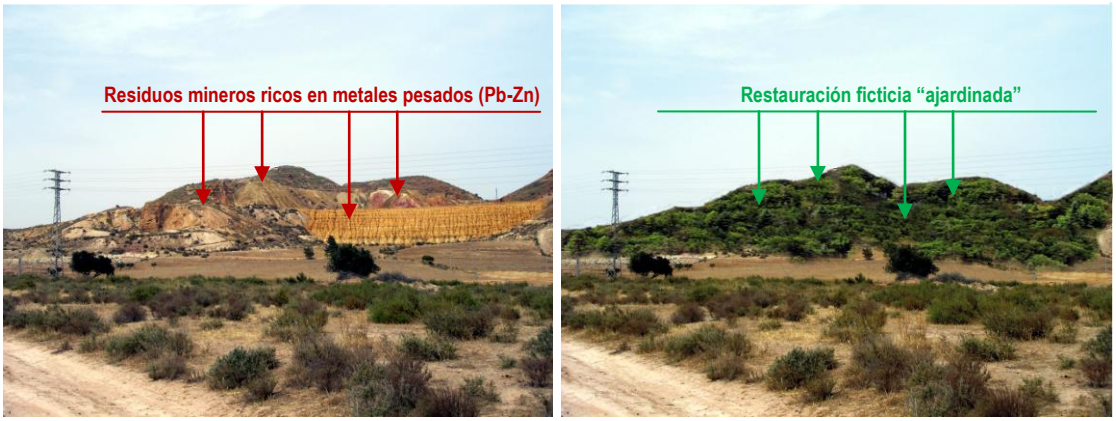
Sin embargo, incluso las zonas de "desastre ambiental" pueden tener un lado positivo desde un punto científico y educativo, y en este sentido, Mazarrón y La Unión no son una excepción. Por ejemplo, la formación de drenaje ácido de mina en San Cristóbal – Perules ofrece condiciones únicas para la observación de la formación de minerales, tales como sulfatos complejos e hidróxidos. Además, dado el clima mediterráneo de la región, en lugar de un flujo permanente de drenaje ácido, lo que normalmente se forman son espectaculares charcas estacionales de color rojo obscuro a naranja (Oyarzun et al., 2011).



Charcas menguantes de drenaje ácido de mina en Mazarrón (San Cristóbal – Perules).

5.3.5 Limpieza y conservación de sitios mineros contaminados de gran valor educativo: ¿una cuestión conflictiva?

Si las minas abandonadas de Mazarrón o La Unión y su entorno pudieran ser consideradas como sitios de patrimonio geológico, entonces se debería desarrollar una política firme a la vez que inteligente en relación a los temas ambientales. Cualquier trabajo ambiental debería comenzar con medidas de remediación, orientadas corrección, mitigación o eliminación de los contaminantes de los sitios mineros que pudieran tener efectos adversos sobre el medioambiente o la salud humana. En este sentido, las restauraciones de "jardinería" que tanto gustan a muchos no resuelven los problemas de fondo, que en este caso se relacionan con la dispersión de metales pesados como el plomo o zinc e incluso un metaloide como el arsénico.

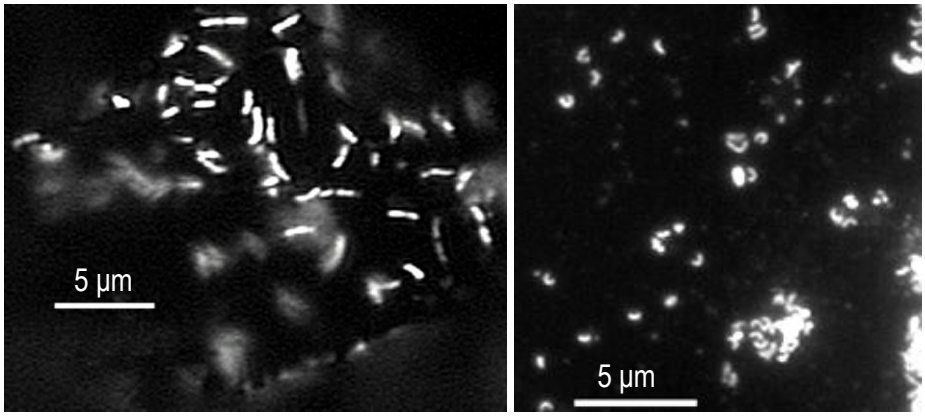


Caso ficticio: Mazarrón con restauración "ajardinada". Ocultar lo que había con tierra vegetal y plantas de invernadero. Una tentación para las autoridades y empresas de "asesoría" ambiental. ¿Ficción? En el caso de Mazarrón lo es (la imagen de la derecha se ha conseguido por clonación con otra), pero existen casos en que desgraciadamente se ha "ajardinado" el paisaje cubriendo con geotextiles, tierra vegetal y plantas.

Podemos "esconder" la zona contaminada con tierra limpia vegetal, incluso podemos plantar algunas flores y árboles, pero si no se adoptan las medidas adecuadas (ver apartados *4.5.2* a *4.5.4*) el problema no desaparecerá, ya que los metales y metaloides seguirán contaminando los acuíferos. Recordemos que si no se "ahoga" con suelos la escombrera o balsa, el oxígeno seguirá accediendo a esta induciendo la oxidación de pirita y la consecuente generación de drenaje ácido portador de metales pesados. Además, si la erosión no se mantiene a raya, los materiales contaminados encontrarán su camino hacia los cursos fluviales.

Por otra parte, cabe preguntarse si los terrenos de una mina que ha sido objeto de una importante rehabilitación podrán ser considerados después de esto como "auténticos", o por el contrario, que lo que acabaremos teniendo es un "parque temático" sólo apto para turistas poco o nada entendidos en la geología de yacimientos minerales o la minería.

De hecho, si los residuos son totalmente eliminados, y el área es cubierta con tierra limpia y plantas, el sitio puede perder gran cantidad de sus valores educativos. Por ejemplo, si las balsas se eliminan por completo el drenaje ácido de mina no volverá a formarse, por lo que no habrá manera de observar en el futuro un fenómeno natural con una compleja química y mineralogía. El mejor ejemplo de drenaje ácido en España es el Río Tinto. Allí, las condiciones extremas del hábitat son consecuencia de la actividad de microorganismos quimiolitotróficos que prosperan en los substratos minerales de la Faja Pirítica Ibérica (Amils et al., 2007). Por lo tanto, lagunas o arroyos con drenaje ácido no han de considerarse simplemente como otra forma de contaminación activa sino también como micro-ecosistemas complejos, que incluso pueden ofrecer claves biológicas sobre el origen de la vida en la Tierra (Russell y Hall, 1997; Amils et al., 2007; entre otros).



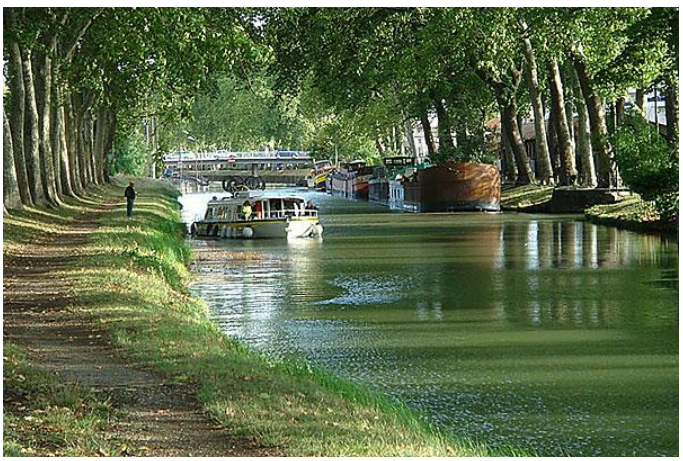
Micro-ecosistemas bacterianos como los que abundan en el drenaje ácido derivado de la oxidación de la pirita a la que estos organismos quimiolitotróficos contribuyen activamente. A la izquierda bacterias en un sedimento piritífero; a la derecha, Leptospirillum ferrooxidans (Schrenk et al., 1998).

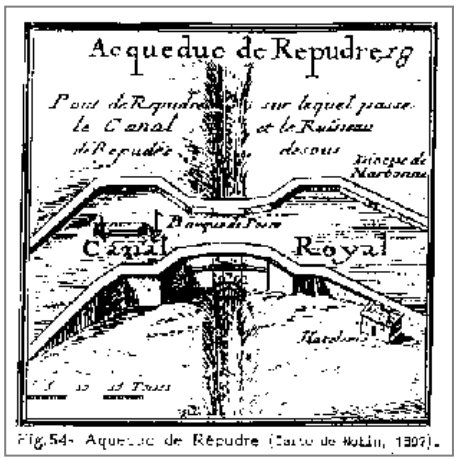
5.3.6 Buscando el equilibrio entre opciones aparentemente contrapuestas

Es difícil encontrar un lugar en Europa en condiciones prístinas. Milenios de ocupación humana han modificado profundamente no sólo los ecosistemas originales sino también el paisaje. El ser humano transformó el bosque para sostener las actividades agrícolas y obtener madera, modificó los ríos para su uso como vías comerciales, penetró en las montañas para facilitar las comunicaciones construyendo túneles, desarrollando de manera sostenida una red compleja de carreteras y ferrocarriles en todo el continente. Incluso la elogiada dehesa española, un sistema agro-silvo-pastoral formado por bosques abiertos de encina (*Quercus rotundifolia*) es obra del ser humano.



La dehesa del campo español cerca del Río Pusa (Toledo). Hermosa pero artificial, una alteración antrópica del medio (imagen[11]).





El bucólico Canal du Midi en el sur de Francia, a la izquierda una imagen actual; a la derecha, obras en la época de su construcción (imágenes[12,13]).

Todas estas modificaciones tienen algo en común: son el resultado de las actividades económicas. Nos guste o no, el hecho es que el ser humano modifica la naturaleza, primero para sobrevivir y luego para obtener beneficios de ella. Habiendo dicho todo esto ¿realmente podemos trazar una frontera clara entre la naturaleza virgen y la modificada en Europa? Sugerimos aquí que de la misma manera que podemos disfrutar de la navegación a lo largo de los maravillosos paisajes que rodean el Canal du Midi en el sur de Francia (un canal artificial abierto en 1681), también podemos admirar las rocas que siglos de minería han dejado expuestas en antiguos sitios mineros.



La didáctica de un afloramiento minero. Filón expuesto por las obras mineras en Pedreras Viejas (Distrito de Mazarrón). A la izquierda, el afloramiento oxidado y lixiviado (flecha roja) con minerales oxidados de cobre (flecha amarilla); a la derecha detalle de los oxidados de cobre (color verde) donde también se pueden observar estrías bien desarrolladas y escalones de falla (círculo amarillo).

> ***In Search of Yellow Gold*** *(Betty McCrimmon)*
>
> *… When miners by the thousands came*
> *In search of yellow gold.*
> *And somewhere in the mountains*
> *In the streams and in the ground,*
> *There's gold, I'm oh so sure there's gold,*
> *That built up this great town.*
> *And off in darkened shadows*
> *A spectre stands so bold,*
> *To yell Bonanza, when we search*
> *And find the yellow gold …*
>
> *The Cariboo Mining Association (2011)*

Pero seamos claros, no estamos ni remotamente sugiriendo aquí que los residuos mineros deban ser considerados como "maravillas de la naturaleza", empezando por el hecho de que son una obra humana. No obstante, las rocas, estructuras y minerales expuestos por la minería deberían ser preservados e incluso recibir el estatus de patrimonio geológico si su importancia educativa y social lo acredita. Por otra parte, destaquemos aquí el valor estético-paisajístico que pueden tener algunos residuos mineros, especialmente en cuanto a colorido y formas erosivas. Además los residuos poseen un importante valor educacional y pueden contribuir a entender mejor algunas reacciones químico-mineralógicas.



Balsa y otros residuos minero-metalúrgicos en San Cristóbal – Perules, Distrito Minero de Mazarrón. Los intensos colores rojos y anaranjados se deben a procesos de oxidación de la pirita contenida en los residuos. La zona circular anaranjada y blanca corresponde a una charca de drenaje ácido desecada.

En este sentido, el grupo Friends of Canadian Geoheritage (*Amigos del Patrimonio Geológico*) propone que los sitios de patrimonio geológico deberían tener la capacidad de (Donaldson, 2005):

1. Exponer un registro único o fundamental de la historia natural.
2. Contribuir a la comprensión de la historia natural de la región.
3. Ser científicamente importantes, o de utilidad importante en la educación.
4. Ofrecer valores estéticos y culturales.

En base a estos principios, tanto Mazarrón como La Unión podrían cualificar perfectamente para su designación como patrimonio geológico. Por otra parte, dado que los yacimientos minerales no son singularidades repartidas al azar, sino que están íntimamente relacionados con las formaciones de rocas que los albergan y las estructuras locales y regionales, debería ser protegido no solo el entorno inmediato de las minas sino todo el bloque regional en el que se insertan las mineralizaciones, como por ejemplo el bloque montañoso de la Sierra de Cartagena que alberga el distrito minero de La Unión – Cartagena.

La Sierra Minera, territorio de paisajes insólitos por descubrir

La sierra de Cartagena-La Unión es una cordillera litoral de unos 25 kilómetros de longitud donde se encuentra uno de los distritos mineros más importantes de la Península Ibérica. Adentrarse en la Sierra Minera es una experiencia que no defrauda al visitante. Y es que allí se pueden contemplar unos parajes en los que la actividad minera ha dejado una huella evidente, configurando a lo largo de los siglos un territorio de belleza singular. A pesar de no ser muy extensa, esta zona destaca por la gran variedad de sus paisajes, fruto de una evolución histórica muy ligada a la minería desde tiempos remotos …

Laopiniondemurcia.es (2010)



La antigua mina subterránea Agrupa Vicenta, en la Ruta del 33. Hoy en día se desarrollan visitas guiadas a este interesante vestigio de pasadas actividades mineras, el cual se inserta en un entorno geológico de inmenso interés (Parque Minero de la Unión, 2010).

El interés de la Sierra de Cartagena va más mucho más allá de su rica historia humana e industrial, ya que esas montañas son como un libro abierto sobre la evolución tectónica, magmática y sedimentaria alpina de la región.

La recesión económica que comenzó en 2008 ha ralentizado la construcción de casas, hoteles, puertos deportivos, la principal fuerza amenazante para el medioambiente en el sureste de España y en otros lugares del país. Sin embargo, una vez que se retome un crecimiento sostenido, y debido a que el ser humano rara vez aprende lecciones (de ningún tipo), la geología de la Sierra de Cartagena continuará desapareciendo bajo toneladas de hormigón y ladrillos. Esperemos que se pueda conceder algún estatus de protección "geológica" a este ámbito territorial antes de que sea demasiado tarde.

5.3.7 Propuestas

López García et al. (2011) no aprecian razones de peso para denegar un estatus de protección como sitio de "patrimonio geológico" a las minas y distritos mineros con atributos científicos, educativos y sociales distintivos. De hecho, desde el punto de vista de la conservación, y bajo una perspectiva educativa, la minería puede ser una bendición para los geólogos, porque tanto a cielo abierto como en las operaciones subterráneas revela aspectos de la geología que de otra manera serían desconocidos para la comunidad científica y educativa.

En este sentido, la mina de Naica, en México, con sus cristales gigantes de yeso proporciona un buen ejemplo de por qué algunos sitios mineros pueden y deben recibir el estatus de sitio de patrimonio geológico. Sin embargo, teniendo en cuenta que nuestras propuestas se dirigen a sitios mineros antiguos, los aspectos ambientales de esta materia también deben ser considerados. Por otra parte, incluso los riesgos ambientales, tales como las charcas de drenaje ácido de mina

(como las de Mazarrón y Cartagena - La Unión) podrían optar a algún tipo de protección. Como se explicó anteriormente, hablamos de micro-ecosistemas que pueden ser valiosos para la investigación científica. En estos casos habría que estabilizar el fenómeno, evitando su propagación mediante barreras profundas reactivas, neutralizadoras-reductoras (Striegel et al., 2001). La barrera reactiva permeable (BRP) es una tecnología relativamente nueva que puede ser un remedio rentable y de bajo mantenimiento de un sitio contaminado.



La Crisoleja, Ruta del 33 en la Sierra de Cartagena. Singular caso de mineralización de estaño asociada a un domo, única en su tipo en España y Europa. Un valor geológico que debe ser protegido. Recuadro: corte interpretativo.

Por último, como proponen López García et al. (2011), si una mina abandonada o distrito minero tiene el suficiente valor geológico, no sólo las minas deberán ser protegidas, sino que también el bloque geológico que las alberga debería quedar cubierto por aquella protección oficial. En este sentido, la Sierra de Cartagena es uno de los activos geológicos más valiosos del sureste de España.

Bibliografía

Atención: *Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.*

Amils, R., González-Torila, E., Fernández-Remolara, D., Gómez, F., Aguilera, A., Rodríguez, N., Malki, M., García-Moyano, A., Fairén, A.G, de la Fuente, V. y Sanz, J.L., 2007. Extreme environments as Mars terrestrial analogs: The Rio Tinto case. Planetary and Space Science, 55, 370-381.

APEC, 2011. Drinking Water Contaminants- Mercury. Contaminants Fact Sheets, http://www.freedrinkingwater.com/water-contamination/mercury-contaminants-removal-water.htm

Appleton J.D., Weeks J.M., Calvez J.P.y Beinhoff, C., 2006. Impacts of mercury contaminated mining waste on soil quality, crops, bivalves, and fish in the Naboc River area, Mindanao, Philippines. Science of the total Environment, 354, 198-211.

Araneda, R.,1985. Nuevos aportes al conocimiento de la geología de El Indio, yacimiento de oro, plata y cobre. Coquimbo, Chile. Revista Minerales, 168, 27-39.

Baldi, F., Pepi, M. y Filippelli, M., 1993. Methylmercury resistance in *Desulfovibrio desulfuricans* strains in relation to methylmercury degradation. Applied Environmental Microbiology, 59, 2479-2485.

Benito, R., López-Ruiz, J., Hertogen, J., Cebriá, J.M., Doblas, M., Oyarzun, R. y Demaiffe, D., 1999. Sr and O isotope contraints on the source and crustal contamination in the high-K calc-alkaline and shoshonitic Neogene volcanic rocks of Spain. Lithos, 46, 773-802.

Berzas Nevado, J.J., García Bermejo, L.F. y Rodríguez Martín-Doimeadios, R.C., 2003. Distribution of mercury in the aquatic environment at Almadén, Spain. Environmental Pollution, 122, 261-271.

Berzas Nevado, J.J., Rodríguez Martín-Doimeadios, R.C. y Moreno, M.J., 2009, Mercury speciation in the Valdeazogues River-La Serena Reservoir system: Influence of Almadén (Spain) historic mining activities. Science of the Total Environment 407, 2372-2382.

Bissig, T., Clark, A.H., Lee, J.K.W. y Hodgson, C.J., 2002. Miocene landscape evolution and geomorphologic controls on epithermal processes in the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile and Argentina. Economic Geology, 97, 971-996.

Bueno, P.C., Bellido, E., Rubí, J.A.M. y Ballesta, R.J., 2009. Concentration and spatial variability of mercury and other heavy metals in surface soil samples of periurban waste mine tailing along a transect in the Almadén mining district (Spain). Environmental Geology, 56, 815-824.

Camus, F., 1975. Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wall-rock alteration. Economic Geology, 70, 1341-1372.

Cornejo, J.A., 2005. Desarrollo y aplicación de un SIG para el análisis de la distribución de mercurio en la red de drenaje de Almadén. Proyecto Fin de Carrera, EUP (UCLM), Almadén (*Inédito*).

Crespi, A., Melgarejo, J.C., Rius, J., Viñals, J., Lorenzo, S., Azcoitia, I., Gil, A., Espallargas, R., Echevarría, A. y Asensio, E., 2008. Minerales supergénicos de Hg de almadén: una forma natural de fijar mercurio. Macla, 9, 69-70.

Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2010. The Mercury Export and Data (Enforcement) Regulations 2010: Guidance Notes. The Department for Environment, Food and Rural Affairs, the UK, http://www.defra.gov.uk/environment/quality/chemicals/ documents/mercury-export-data-regs.pdf

Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2001. Reglamento (CE) No. 466/2001 de la Comisión de 8 de marzo de 2001 por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. http://www.elaw.org/system/files/fcr02_es.pdf

Díez, S., 2009. Human Health Effects of Methylmercury Exposure. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 198, 111-132.

Doblas, M. y Oyarzun, R., 1989. Neogene extensional collapse in the western Mediterranean (Betic-Rif Alpine orogenic belt): implications for the genesis of the Gibraltar Arc and magmatic activity. Geology, 17,430-433.

Donaldson, J.A., 2005. Friends of Canadian Geoheritage. http://http-server.carleton.ca/~jadonald/friends.html

Esbri, J.M., Bernaus, A,. Avila, M., Kocman, D., Garcia-Noguero, E.M., Guerrero, B.,Gaona, X., Alvarez, R., Perez-González, G.,Valiente, M., Higueras, P., Horvat, M. y Loredo, J., 2010 XANES speciation of mercury in three mining districts - Almadén, Asturias (Spain), Idria (Slovenia). Journal of Synchrotron Radiation, 17, 179-186.

Evanko, C.R. y Dzombak, D.A., 1997. Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, 61 pp., http://www.cluin.org/download/toolkit/metals.pdf

García-Ruiz, J.M., Villasuso, R., Ayora, C., Canals, A. y Otálora, F., 2007. Formation of natural gypsum megacrystals in Naica, Mexico. Geology, 35, 327-330.

Gray, J.E., Hines, M.E., Higueras, P., Adatto, I., Lasorsa, B.K., 2004. Mercury speciation and microbial transformations in mine wastes, stream sediments, and surface waters at the Almadén Mining District, Spain. Environmental Science and Technology, 38, 4285-4292.

Guzmán, R., 1986. Reseña geológica de algunos de los más importantes yacimientos chilenos de cobre del tipo diseminado. En: Frutos, J., Oyarzun, R., Pincheira, M. (eds.), Geología y Recursos Minerales de Chile. Universidad de Concepción, Concepción, 2, 509-545.

Hageman, S. y Schönwiese, D., 2010. Technical and Economic Criteria for Processing Mercury-Containing Tailings. United Nations Environment Programme Division of Division of Technology, Industry, and Economics Chemicals Branch, http://www.unep.org/hazardoussubstances/LinkClick.aspx?fileticket=ZZA8oVEYfmM%3d&tabid=3536&language=en-US

Hamdy, M.K. y Noyes, O.R., 1975. Formation of methyl mercury by bacteria. Applied Microbiology, 30, 424-432.

Heald, P., Foley, N.K. y Hayba, D., 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid sulfate and adularia-sericite types. Economic Geology, 82, 1-26.

Health Care, 2011. Mercury legislation in the EU. http://www.noharm.org/europe/issues/toxins/mercury/laws.php#restrictions

Higueras, P. Crespo, J.L. y Hernández, A., 1997. Historia de la mina de mercurio de La Nueva Concepción. En: Mansilla, L.; Fernández Barba, R.C. (Coord.). Actas de la primera sesión científica sobre patrimonio minero metalúrgico. Colección Ciencia y Técnica, Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha: 211-222..

Higueras, P., Oyarzun, R., Lunar, R., Sierra, J. y Parras, J., 1999. The Las Cuevas deposit, Almadén district (Spain): unusual case of deep-seated advanced argillic alteration related to mercury mineralization. Mineralium Deposita, 34, 211-214.

Higueras, P., Oyarzun, R., Biester, H., Lillo, J., Lorenzo, S., 2003. A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almadén mining district, Spain. Journal of Geochemical Exploration, 80, 95-104.

Higueras, P., Oyarzun, R., Lorenzo, S., Gray, J.E., Biester, H. y Esbrí, J.M., 2004a. Mercurio en el medio ambiente del Distrito de Almadén. Un fenómeno dinámico. http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/Almaden.pdf

Higueras, P., Molina, J.A., Oyarzun, R., Lillo, J. y Esbrí, J.M., 2004b. Identification of the plant-communities and hyperacumulators in mercury contaminated sectors of the Almadén district, Spain. RMZ – Materials and Geoenvironment, 51, 103-107.

Higueras, P., Oyarzun, R., Oyarzún, J., Maturana, H., Lillo, J. y Morata, D., 2004c. Environmental assessment of copper–gold–mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. Applied Geochemistry, 19, 1855-1864.

Higueras, P., Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2005. Atmospheric mercury data for the Coquimbo region, Chile: influence of mineral deposits and metal recovery practices. Atmospheric Environment, 39, 7587-7596.

Higueras, P., Oyarzun, R., Lillo, J., Sánchez Hernández, J.C., Molina, J.A., Esbrí, J.M., Lorenzo, S., 2006. The Almadén district (Spain): anatomy of one of the world's largest Hg-contaminated sites. Science of the Total Environment, 356, 112– 124.

Higueras, P., Esbrí, J.M., Oyarzun, R., Lorenzo, S., Llanos, W., Martínez-Coronado, A., López-Berdonces, M.A., García Noguero, E.M., 2010. Mercurio en Almadén: desde su origen hasta su incorporación al medio ambiente. En: Loredo, J. (Ed.), Nuevos retos en la prospección e investigación de los recursos minerales – Libro Homenaje al Prof. Jesús García Iglesias. Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo, 273-325.

Holmes, C.D., Jacob, D.J. y Yang, X., 2006. Global lifetime of elemental mercury against oxidation by atomic bromine in the free troposphere. Geophysical Research Letters, 33, L20808.

Johnsson, C., Sallsten, G., Schutz, A., Sjors, A. y Barregard, L., 2004. Hair mercury levels versus freshwater fish consumption in household members of Swedish angling societies. Environmental Research, 96, 257-263.

Kabata Pendias, A., 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press. Boca Raton (USA), 413 pp.

Krabbenhoft, D. y Schuster, P., 2002. Glacial ice cores reveal a record of natural and anthropogenic atmospheric mercury deposition for the last 270 Years. USGS Fact Sheet FS-051-02.

Kurland, L.T., Faro, S.N. y Siedler, H., 1960. Minamata disease: the outbreak of a neurologic disorder in Minamata, Japan, and its relationship to the ingestion of seafood contaminated by mercuric compounds. World Neurology, 1, 370-395.

Laopiniondemurcia.es, 2010. La Sierra Minera, territorio de paisajes insólitos por descubrir. http://www.laopiniondemurcia.es/pi-rutas-de-cartagena/2010/10/27/sierra-minera-territorio-paisajes-insolitos-descubrir/267609.html

López García, J.A., Oyarzun, R., López Andrés, S. y Manteca Martínez, J.I., 2011. Scientific, educational, and environmental considerations regarding mine sites and geoheritage: A perspective from SE Spain. Geoheritage, 3, 267-275.

MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G. y Berger, T.A., 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 39, 20-31.

Maksaev, V., Moscoso, R., Mpodozis, C. y Nasi, C., 1984. Las unidades volcánicas y plutónicas del Cenozoico Superior en la alta cordillera del Norte Chico (29º-31ºS): geología, alteración hidrotermal y mineralización. Revista Geológica de Chile, 21, 11-51.

Manteca Martínez, J.I. y Ovejero Zapino, G., 1992. Los yacimientos de Zn, Pb, Ag - Fe del distrito minero de La Unión - Cartagena, Bética oriental. En: Recursos Minerales de España (J. García Guinea y J. Martínez Frías, Coords), CSIC, Madrid, 1085-1102.

Manteca Martínez, J.I., Pérez de Perceval Verde, M.A. y López-Morel, M.A., 2005. La industria minera en Murcia durante la época contemporánea. http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/416/1/imm.pdf

Martínez Coronado, A., Oyarzun, R., Esbrí, J.M., Llanos, W. e Higueras, P., 2011. Sampling high to extremely high Hg concentrations at the Cerco de Almadenejos, Almadén mining district (Spain): The old metallurgical precinct (1794 to 1861 AD) and surrounding areas. Journal of Geochemical Exploration, 109, 70-77.

Millán, R., Gamarra, R., Schmid, T., Sierra, M.J., Quejido, A.J., Sánchez, D.M., Cardona, A.I., Fernández, M. y Vera, R., 2006. Mercury content in vegetation and soils of the Almadén mining area (Spain). Science of the Total Environment, 368, 79-87.

McDowell, M.A., Dillon, C.F., Osterloh, J., Bolger, P.M., Pellizzari, E., Fernando, R. et al. (2004) Hair mercury levels in US children and women of childbearing age: Reference range data from NHANES 1999-2000. Environmental Health Perspectives, 112, 1165-1171.

Molina, J.A., Oyarzun, R., Esbrí, J.M. e Higueras, P., 2006. Mercury accumulation in soils and plants in the Almadén mining district, Spain: One of the most contaminated sites on Earth. Environmental Geochemistry and Health 28, 487-498.

Moreno, T., Higueras, P., Jones, T., McDonald, I. y Gibbons, W., 2005. Size fractionation in mercury-bearing airborne particles ($HgPM_{10}$) at Almadén, Spain: Implications for inhalation hazards around old mines. Atmospheric Environment 39 (34), pp. 6409-6419.

NIOSH, 2006. NIOSH pocket guide to chemical hazards. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health.

Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Oyarzun, R., Márquez, A., Ortega, L., Lunar, R. y Oyarzún, J., 1995. A late Miocene metallogenic province in southeast Spain: atypical Andean-type processes on a smaller scale. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section B: Applied Earth Science), 104, 197-202.

Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. y Oyarzún, J., 1996. The manto-type gold deposits of Andacollo (Chile) revisited: a model based on fluid inclusion and geological evidence. Economic Geology, 91:1298-1309.

Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. y Oyarzún, J., 1998. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts. Mineralium Deposita, 33, 547-559.

Oyarzun, R, Oyarzún, J., Ménard, J.J. y Lillo, J., 2003. The Cretaceous iron belt of northern Chile: role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone. Mineralium Deposita, 38: 640-646.

Oyarzun, R., Lillo, J., Higueras, P., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio–Tambo district) vs. geologic processes. Journal of Geochemical Exploration, 84, 53-64.

Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzún, J., Higueras, P. y Maturana, H., 2006a. Strong metal anomalies in stream sediments from semiarid watersheds in northern Chile: When geological and structural analyses contribute to understanding environmental disturbances. International Geology Review, 48, 1133-1144.

Oyarzun, R., Guevara, S., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. e Higueras, P., 2006b. The As-contaminated Elqui river basin: a long lasting perspective (1975–1995) covering the initiation and development of Au–Cu–As mining in the high Andes of northern Chile. Environmental Geochemistry and Health, 28: 431-443.

Oyarzun, R., 2007. Ciencia, revistas científicas y el Science Citation Index: o cómo volvernos locos a golpe de números. Aula2puntonet, Ciencia y Sociedad, http://www.aulados.net/Ciencia_Sociedad/Ciencia_indices /SCI_revistas_investigadores.pdf

Oyarzun, R., Higueras, P., Esbrí, J.M. y Pizarro, J., 2007a. Mercury in air and plant specimens in herbaria: A pilot study at the MAF Herbarium in Madrid (Spain). Science of the Total Environment 387, 346-352.

Oyarzun, R, Lillo, J., Oyarzún, J. e Higueras, P., 2007b. Plate interactions, evolving magmatic styles, and inheritance of structural paths: development of the gold-rich, Miocene El Indio epithermal belt, northern Chile. International Geology Review, 49, 844-853.

Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzun, J., Maturana, H. e Higueras, P. 2007c. Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion - contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. Environmental Geology, 53, 283-294.

Oyarzun, R., Higueras, P., Lillo, J., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2010. Investigando temas minero-ambientales en el norte de Chile: más allá de los megaproyectos, la investigación formateada y la retórica ambientalista. Tierra y Tecnología, 37, 81-90.

Oyarzun, R., Lillo, J., López García, J.A., Esbrí, J.M., Cubas, P., Llanos, W. e Higueras, P., 2011. The Mazarrón Pb–(Ag)–Zn mining district (SE Spain) as a source of heavy metal contamination in a semiarid realm:

Geochemical data from mine wastes, soils, and stream sediments. Journal of Geochemical Exploration, 109, 113-124.

Parque Minero de La Unión, 2011. Inicio. http://www.parqueminerodelaunion.es/

Phelps, R.W., Clarkson, T.W., Kershaw, T.G. y Wheatley B., 1980. Interrelationships of blood and hair mercury concentrations in a North-American population exposed to methylmercury. Archives of Environmental Health, 35, 161-168.

Platt, J.P. y Vissers, R.L.M., 1989. Extensional collapse of thickened continental lithosphere: a working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar Arc. Geology, 17, 540-543.

Plumlee, G.S., 1999. The environmental geology of mineral deposits. En: Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds.), The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Parte A: Processes, Techniques, and Health Issues. Reviews in Economic Geology, 6A, 71-116.

Plumlee, G.S. y Nash, J.T., 2004. Geoenvironmental models of mineral deposits- Fundamentals and applications. En: du Bray, E.A. (ed), Preliminary Compilation of Descriptive Geoenvironmental Mineral Deposit Models, USGS Open-File Report, 95–0831, 1-9 http://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0831/

Porter GeoConsultancy, 2001. El Indio Belt. http://www.portergeo.com.au/database/mineinfo.asp?mineid=mn071

Robles-Arenas, V.M., Rodríguez, R., García, C, Manteca, J.I. y Candela, L., 2006. Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena–La Unión (SE Spain) case study. Environmental Geology, 51, 47-64.

Rodríguez, P. e Hidalgo, R., 1997. Valoración de los recursos minerales en el núcleo minero de Mazarrón. http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-RNMA-c16/$File/RNMA-c16.pdf

Rodriguez-Martin, R.C., Wasserman, J.C., Garcia Bermejo, L.F., Amouroux, D., Berzas Nevado, J.J. y Donard, O.F.X., 2000. Chemical availability of mercury in stream sediments from the Almadén area, Spain Journal of Environmental Monitoring, 2, 360-366.

Rössler, H.J. y Lange, H., 1972. Geochemical Tables. Elsevier, Amsterdam, 468 pp.

Rusell, M.J. y Hall, A.J., 1997. The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front. Journal of the Geological Society, 154, 377-402.

Sánchez, D.M., Quejido, A.J., Fernández, M., Hernández, C., Schmid, T., Millán, R., González, M., Aldea, M.; Martín, R. y Morante, R., 2005. Mercury and trace element fractionation in Almadén soils by application of different sequential extraction procedures. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 381, 1507-1513.

Schrenk, M.O., Edwards, K.J., Goodman, R.M., Hamers, R.J. y Banfield, J.F., 1998. Distribution of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans*: Implications for generation of acid mine drainage. Science, 279, 1519-1522.

Schwesig, D. y Krebs, O., 2003. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem. Plant and Soil, 253, 445–455.

Senesi, G.S., Baldassare, G., Senesi, N. y Radina, B., 1999. Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health. Chemosphere, 39, 343-377.

Sharples, C., 2002. Concepts and principles of geoconservation. Tasmanian Parks and Wildlife Service, http://www.dpiw.tas.gov.au/inter.nsf/Attachments/ SJON-57W3YM/$FILE/geoconservation.pdf

Sociedad Geológica de España, 2011. Patrimonio Geológico, Legislación. http://www.sociedadgeologica.es/patrimonio_legislacion.html

Striegel, J., Sanders, D.A. y Veenstra, J.N., 2001. Treatment of contaminated groundwater using Permeable Reactive Barriers. Environmental Geosciences, 8, 258-265.

Sunderland, E.M., Krabbenhoft, D.P., Moreau, J.W., Strode, S.A. y Landing, W.M., 2009. Mercury sources, distribution, and bioavailability in the North Pacific Ocean: Insights from data and models. Global Biogeochemical Cycles, 23, doi:10.1029/2008GB003425.

US EPA, 1992. Water quality standards: establishment of numeric criteria for priority toxic pollutants; states' compliance; final rule. Fed. Regist. 1992, 40 CFR Part 131, 57/246, 60847-60916.

US EPA, 2007. Mercury response guidebook — section 3. http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/mercury/pdf/chapter3.pdf, May

UTE Fundación Sierra Minera y Restauralia Cartago, 2011. Mining Park of La Unión - Parque Minero de La Unión http://www.parqueminerodelaunion.es/public/upload/descargas/MINING%20PARK.pdf

The Cariboo Mining Association, 2011. In Search of Yellow Gold. http://cariboominingassociation.com/golden-tales-poems/

Veit, H., 1996. Southern Westerlies during Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in Norte Chico, northern Chile. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 123, 107-119.

WHO, 1971. International Standards for Drinking Water, 3rd ed. World Health Organization: Geneva, Switzerland.

WHO, 2000. Air quality guidelines for Europe. WHO Regional Publications European Series 91, World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen, 288pp.

Wikipedia, 2011a. Minamata disease. http://en.wikipedia.org/wiki/Minamata_disease

Wikipedia, 2011b. Festival del Cante de las Minas. http://es.wikipedia.org/wiki/Festival_del_Cante_de_las_Minas

Fuentes de las imágenes (a Octubre-Noviembre de 2011)

1. http://www.minservice.com/store/scripts/prodlist.asp?idcategory=64
2. http://www.panoramio.com/user/163214/tags/Almad%C3%A9n
3. http://en.lacerca.com/news/turismo/almaden_mines_park_heritage-18856-1.html
4. http://www.lacerca.com/noticias/turismo/el_parque_minero_almaden-18856-1.html
5. http://www.pueblos-espana.org/castilla+la+mancha/ciudad+real/almadenejos/R%EDo+Valdeazogues/
6. http://www.panoramio.com/photo/37324713
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Procambarus_clarkii
8. https://almacosta.wordpress.com/2011/03/18/cierre-modelo-para-la-mayor-mina-de-oro-del-mundo/
9. http://imnotaginger.com/2011/05/27/standing-out-in-the-crowd/
10. http://www.gps.caltech.edu/~ryan/realultimatepower.htm
11. http://contactonatura.blogspot.com/2011/08/rio-pusa-1.html
12. http://www.bugbog.com/european_countries/france_travel_guide/france_boat_cruises.html
13. http://www.canal-du-midi.org/en/canal/the_course/art_structures/repudre_canal_bridge.aspx

6. EPÍLOGO: CUANDO EL FUTURO NOS ALCANCE

6.1 Pasado imperfecto

"Todo tiempo pasado fue mejor" es una frase que no siempre tiene (mucho) sentido, y como muestra un botón ¿alguien querría volver a la Edad Media? De hecho, solo en contadas ocasiones podemos decir esta máxima en propiedad. En este sentido, valga la oportunidad que brinda este epílogo para decir que entre estos escasos ejemplos destaca el tema de la educación, sobre todo la universitaria que es donde nos movemos. Si alguien se hubiera propuesto ir contra esta, en Chile o en España (que son los dos casos que mejor conocemos), no lo habría conseguido de mejor manera. En la educación coexisten dos realidades, el mundo "virtual y edulcorado" de las autoridades y el "real" del día a día de las aulas de clase. Pero dejemos la educación y regresemos a la minería, donde parafraseando la máxima con que abríamos este epílogo, deberíamos decir que: "todo tiempo pasado fue definitivamente peor". Todo sea dicho, vivimos en medio de un legado desastroso de minas abandonadas. Algunas de estas representan tan solo cicatrices en el paisaje, otras, aparte de las cicatrices, constituyen fuentes de dispersión de efluentes tóxicos cargados de metales pesados y metaloides.

Una vez planteado todo esto, y solo para no perder el norte en un tema de tanta importancia, digamos también en defensa de esta actividad que sin la minería viviríamos literalmente en la "Edad de Piedra", y quizás ni eso, ya que las piedras del Paleolítico y Neolítico salieron de alguna parte, por ejemplo, de una primitiva cantera con los materiales adecuados. Desde ahí nuestros antepasados extrajeron sus primeras materiales líticos para herramientas y armas y ya de paso, causaron el primer impacto ambiental derivado de la minería.





Primeros asentamientos humanos y una gran urbe moderna (Madrid). Una revolución tecnológica que ha sido posible gracias a la minería (imágenes[1,2]).

Se han cometido errores en el pasado, qué duda cabe, pero estos ocurrieron en una época en la que no existía consciencia alguna sobre la fragilidad de nuestro planeta. De ahí que las cosas se hicieran sin pensar demasiado (o nada) en el mañana, haciendo buena la frase de *après moi, le déluge*.



La mina Ok Tedi en Papúa Nueva Guinea y el vertido de residuos al sistema fluvial circundante (imágenes[3,4]). La flecha indica uno de los principales puntos de vertidos. Todo el Río OK Tedi Tedi está contaminado con colas de flotación (Kay, 1995), cosa que aprecia fácilmente en las imágenes superiores en tonos grises.

Por otra parte, las empresas mineras empiezan fuertemente a moverse hacia planes de sostenibilidad integrales, mostrando una genuina preocupación por los temas ambientales. Tal es el caso, entre muchos, de Minera Los Pelambres (Chile), que ha impulsado varios programas de conservación de la naturaleza.

Corema aprueba inversión de Minera Los Pelambres en humedal de Laguna Conchalí

La construcción de un sendero de 640 metros de longitud y cuatro lugares de observación -de la flora y fauna- son los principales trabajos que realizará la compañía para la conservación y difusión de este Santuario de la Naturaleza y sitio Ramsar.

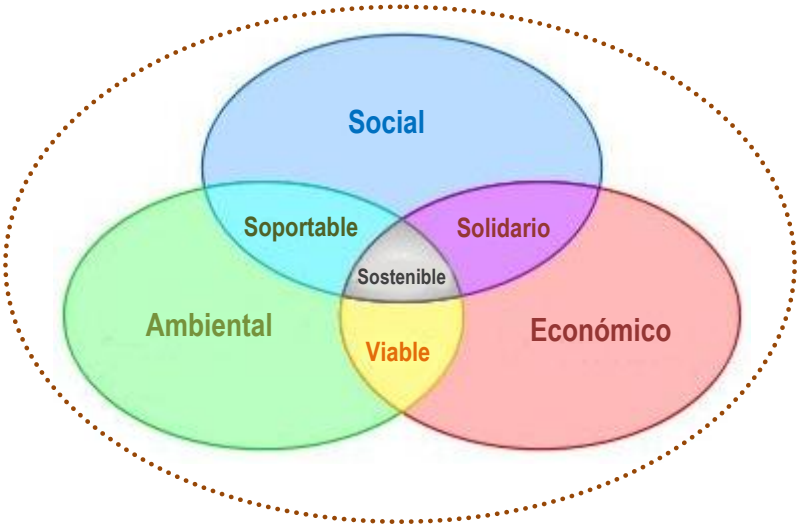
Minería Chilena (2008)



El Humedal de Laguna Conchalí (Región de Coquimbo, Chile), actualmente convertido en Santuario de la Naturaleza a solicitud de Minera Los Pelambres (imágenes[5,6]).

6.2 Minería y sostenibilidad ¿la cuadratura del círculo?

A diferencia del viejo problema de construcción geométrica que perturbó tanto a los matemáticos griegos y a las generaciones que después vendrían, pensamos que "en cierta medida" podemos hacer que minería y sostenibilidad sean conceptos compatibles. Obviamente, por mera definición la minería induce impactos, pero también a estas alturas del libro, deberíamos saber que con buen hacer y tecnología, podemos minimizar esos problemas ambientales. Por otra parte, no debemos olvidar que la sostenibilidad es "algo más" que medioambiente en plan purista y neoreligioso. La sostenibilidad contempla además todo aquello que tiene que ver con el ser humano y las sociedades en que este se desarrolla. Está muy bien salvar a determinada especie en peligro, pero no a cualquier coste. Si quitamos al ser humano de la ecuación algo muy malo y preocupante podría estar ocurriendo en nuestra sociedad. De ahí que en cualquier balance sobre sostenibilidad debamos conciliar tres aspectos, lo social, lo ambiental y lo económico. Sin el aspecto económico no hay desarrollo, sin lo ambiental ponemos en riesgo nuestros ecosistemas, pero sin lo social los dos primeros puntos tienen escaso sentido salvo que, como opinan algunos extremistas, se considere al ser humano como un "parásito" a escala planetaria y que por lo tanto no haya que tener demasiadas consideraciones con el mismo.



Los factores ambientales, económicos, sociales y sus interacciones. Cualquiera sea el modelo de elección, no hay que olvidar que el objetivo último de cualquier actividad económica debe basarse hoy en día en la sostenibilidad de la misma (imagen[7]).Tomada de Oyarzún y Oyarzun (2011).

En el momento actual "podemos" y sobre todo "debemos" alcanzar un equilibrio justo para todas las partes implicadas en el devenir económico, social y ambiental. Esto tiene que ir más allá de la retórica política y convertirse en realidades tangibles. No se trata de crear legislaciones y más legislaciones. No es un tema de papeles escritos, e impuestos desde arriba hacia abajo. Se trata de una necesidad que tiene que ser nítidamente perceptible por todas las partes. No pueden las

empresas mineras encerrarse en un mundo de balances y ganancias rápidas, de la misma manera que los grupos conservacionistas deberían empezar a comprender que hay más vocabulario y formas de construir ideas en el idioma (este o cualquiera) que el sempiterno "no, a lo que toque". No puede de igual manera la sociedad decir "sí a la minería, pero lejos de casa".

Todos queremos poder llegar a casa en metro, autobús o coche (*auto*); todos queremos además encender la luz en casa si es de noche y más aun, que haya luz eléctrica si nos están operando en un quirófano; y no se trata tan solo de un tema de fuentes alternativas de energía, porque la electricidad hay que trasportarla a lo largo de un cable de cobre. Nos preguntamos aquí de manera retórica ¿y de dónde viene ese cobre? Como dicen por ahí, la ignorancia no es excusa, y la hipocresía en temas ambientales, menos aun.



Tan solo algunos elementos muy básicos de nuestra vida que dependen al 100 x 100 de que exista una minería vigorosa que atienda las necesidades de la sociedad (imágenes[8-11]).

Persuasión, vigilancia, o incluso imposición del reglamento ambiental a quienes no respeten las reglas del juego. Se puede conseguir la sostenibilidad y se está consiguiendo, sólo hace falta de que todos los agentes sociales creamos en ello y contribuyamos dentro de nuestras posibilidades a que esto sea una realidad global.

Hasta siempre,

Roberto Oyarzun, Pablo Higueras & Javier Lillo
Madrid – Almadén – Móstoles 2011

Bibliografía

Atención: *Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.*

Kay, P., 1995. PNG's Ok Tedi, Development and Environment. Parliamentary Research Service, Current Issues Brief no.4 1995-96, http://www.aph.gov.au/library/Pubs/cib/1995-96/96cib04.pdf

Minería Chilena, 2008. Corema aprueba inversión de Minera Los Pelambres en humedal de Laguna Conchalí.

Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Fuentes de las imágenes (a Noviembre de 2011)

1. http://xtec.cat/crp-girones/caceres/prehistoria1.htm
2. http://www.foroviajes.org/madrid-castilla-leon-castilla-mancha/391-fotos-madrid-fotos-increibles-madrid-ojo-conexiones-lentas.html
3. http://insearchofsimplicity.com/2009/01/26/ok-tedi-and-china-blue/
4. http://patagonia-under-siege.blogspot.com/2008/01/harmony-gold-transforms-tiny-papua-new.html
5. http://www.mch.cl/noticias/imprimir_noticia_neo.php?id=11934
6. http://www.pelambres.cl/m_ambiente/das_5.html
7. http://blog.brambati.it/es/
8. http://turismadrid.free.fr/metro.htm
9. http://www.ahorrodiario.com/transporte/utiliza-bonos-de-varios-viajes-en-el-transporte-urbano
10. http://www.homebuilding.co.uk/feature/electrics-lighting
11. http://www.verticalbandedgastroplasty.org/vertical-sleeve-gastrectomy-surgery-definition/

ANEXO 1: TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Desarrollo de técnicas activas y pasivas para el control del drenaje ácido

Uno de los mayores problemas que plantea la minería es el drenaje ácido. Para su tratamiento se pueden emplear dos tipos de técnicas: activas y pasivas. Las "técnicas activas" son aquellas que se basan en el procesamiento químico del drenaje ácido mediante la adición de reactivos neutralizantes en plan "preventivo", como los ya tratados en el Capítulo 4 (*4.2.2 Corrigiendo impactos ambientales*) (McCloskey et al., 2005). Allí destacamos el uso de: EcobondTM ARD; una tecnología de pasivación utilizando óxido de magnesio; otra basada en el uso de permanganato de potasio; y por último un sellador de resina de alcohol furfurílico. Estos reactivos llevan el pH a valores aceptables, y favorecen la precipitación de los metales pesados que pueda contener el agua. Su principal problema radica en los elevados costes, lo cual significa que no pueden ser empleados de manera extensiva para neutralizar grandes volúmenes de drenaje ácido.

> ***Overview of Passive Systems for Treating Acid Mine Drainage***
>
> *Active chemical treatment of AMD to remove metals and acidity is often an expensive, long term liability. In shave been developed that do not require continuous chemical inputs and that take advantage of naturally occurring chemical and biological processes to cleanse contaminated mine waters. The primary passive technologies include constructed wetlands, anoxic limestone drains (ALD), successive alkalinity producing systems (SAPS), limestone ponds, and open limestone channels (OLC) …*
>
> *… At their present stage of development, passive systems can be reliably implemented as a single permanent solution for many types of AMD and at a much lower cost than active treatment. Relative to chemical treatment, passive systems require longer retention times and greater space, provide less certain treatment efficiency, and are subject to failure in the long term. However, many passive systems have realized successful short-term implementation in the field and have substantially reduced water treatment costs at many mine sites (Faulkner and Skousen 1994). Current research seeks to understand the dynamically complex chemical and biological mechanisms that occur within passive systems and which are responsible for AMD treatment …*
>
> *Skousen (1998)*
>
> *AMD = Acid Mine Drainage*

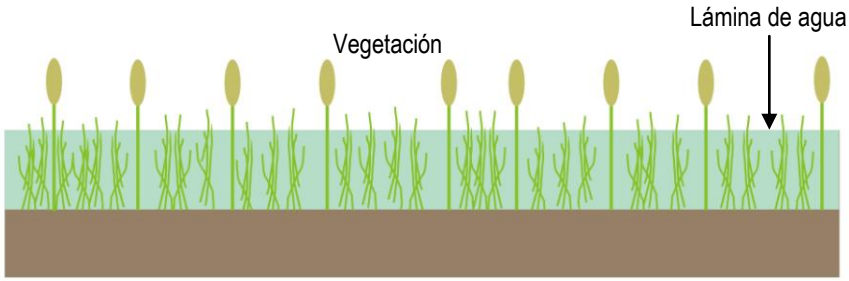
Por su parte las "técnicas pasivas" son las que se emplean para el tratamiento de grandes volúmenes de efluentes mineros. Se basan en la puesta en contacto del drenaje ácido con lo que podríamos denominar "reactivos naturales" o con las condiciones adecuadas para evitar el desarrollo del proceso. Estas técnicas pueden ser variadas y entre otras tenemos:

- <u>Lagunas o ciénagas aeróbicas</u> (*aerobic wetlands*). Una ciénaga o laguna aeróbica consiste en un humedal de suficiente extensión, con flujo superficial horizontal. La laguna puede estar plantada con tifas (p.ej., *Typha latifolia*) u otras especies propias de este tipo de cuencas. Este sistema se utiliza para tratar aguas neutras o alcalinas. Los metales pesados precipitan como consecuencia de reacciones de oxidación, con formación de los correspondientes óxidos o hidróxidos, lo cual tiene su mayor eficiencia a un pH mayor de 5,5. La ventilación/aireación del agua previa a su paso por la laguna se produce haciéndola pasar por pequeños saltos y rápidos. El sistema es especialmente eficiente en la reducción del contenido en hierro, pero el pH puede incrementar considerablemente debido a las reacciones de oxidación.

Entre las plantas acuáticas, dentro del grupo de rivera o margen, se encuentra la popular Typha latifolia. Es una planta perenne y rizomatosa que tiende a expandirse con facilidad y en condiciones óptimas puede alcanzar fácilmente de uno a tres metros de altura. Por ello, es recomendable utilizarse en estanques de dimensiones importantes. Existe también la Typha mínima, algo más pequeña aunque más delicada.



Flores y Plantas (2010)



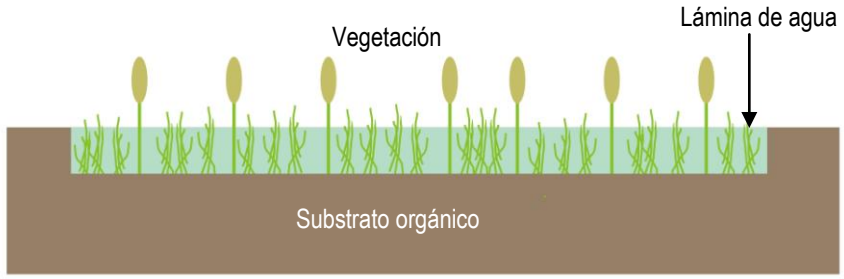
Corte esquemático de un humedal aeróbico.



Humedales aeróbicos (imágenes[1]).

- <u>Lagunas o ciénagas anaeróbicas</u> (*compost or anaerobic wetland*). En este caso se trata de lagunas con una delgada lámina de agua sobre un sustrato rico en materia orgánica, que puede estar constituido por turba, u otros materiales orgánicos como el compost usado de plantaciones de champiñones, virutas de madera, heno, etc., mezclado con un 10% de

carbonato cálcico. A través de este sustrato se produce el flujo de las aguas a depurar, produciendo fundamentalmente la reducción de sulfatos en aguas que contienen oxígeno disuelto, Fe^{3+}, Al^{3+} y con acidez media o baja.



Corte esquemático de un humedal anaeróbico.





Humedales anaeróbicos (imágenes[1]).

- *Canales abiertos de caliza* (*open limestone channels*). Constituyen la forma más simple de tratar el drenaje ácido, y pueden ser de dos tipos: canales recubiertos de caliza a través de los cuales se hace pasar el agua a tratar, o simplemente, añadir trozos de caliza a los canales de desagüe ya existentes. El principal problema que presentan es que los cantos de caliza se recubren de una lámina de óxidos e hidróxidos de hierro que los aíslan, reduciendo la efectividad del proceso a medio-largo plazo. Eso hace necesario utilizar grandes cantidades de caliza. Es también importante la impermeabilización del fondo del canal, para evitar la infiltración del drenaje ácido.

  Puede que los canales abiertos de

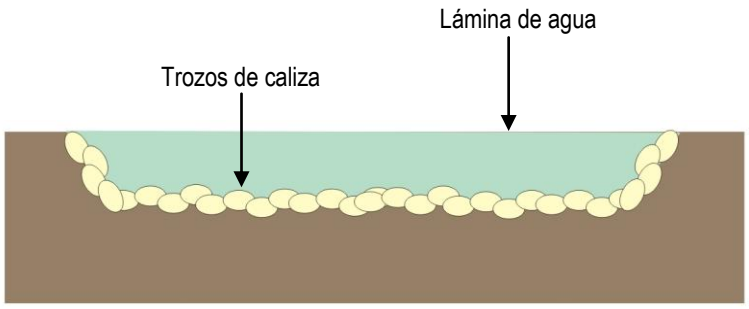
… Open limestone channels, limestone/steel stag check dams, and vertical flow ponds were installed to neutralize acidity and allow metals to settle out of the water before entering the creeks … Although it is still too early to know the full extent of the environmental results of these projects, recent data collected where the Cheat River enters Cheat Lake show that this once-acidic lake has a pH that ranges from around 6.5 to 7.5. Cheat Lake is now home to bass tournaments, a testament to improved water quality.



Open limestone channel running through the woods with coloration starting to show iron precipitate.

US EPA (2011)

caliza no sean una panacea universal, pero allí donde se han utilizado han probado ser de ayuda. Por ejemplo, la US EPA (2011) cuenta sobre un caso muy exitoso llevado a cabo en Estados Unidos en la Cuenca del Cheat River, cerca de la frontera de Pennsylvania. Allí muchos de los ríos han sido tan severamente degradados por el drenaje ácido de mina que estaban efectivamente muertos. Sin embargo, los proyectos de remediación realizados allí mediante canales abiertos con caliza han ayudado significativamente a recuperar las aguas.



Corte esquemático de un canal abierto de caliza.



A la izquierda, construcción y relleno de un canal abierto de caliza; a la derecha, canal ya construido con paso de drenaje ácido (flecha) (imágenes[1,2]).

De cualquier manera, las técnicas de tratamiento pasivo son mucho más baratas que las activas, ya que estas últimas requieren de medidas químicas difíciles de implementar y mantener en el tiempo. Puede que los humedales, aeróbicos o anaeróbicos "no sean la mejor idea" en regiones semiáridas. En esto casos qué duda cabe que las soluciones de bajo coste pasarán por los canales abiertos en caliza, relativamente fáciles de construir y mantener.

Destaquemos aquí que mientras los métodos activos tienen un carácter preventivo (McCloskey et al., 2005), los pasivos están más pensados para mitigar un proceso de acidificación que ya ha comenzado (Faulkner y Skousen, 1995; Skousen, 1998). Además, debido a sus menores costes, estas últimas técnicas son especialmente aconsejables en el caso de sitios mineros abandonados. En estos lugares los costes tienen que ser asumidos por las autoridades locales, regionales o estatales,

que suelen ser poco generosas por lo general en estas materias. Esto es así (normalmente) porque las entidades públicas no disponen habitualmente de los grandes presupuestos que harían falta para atender estas materias adecuadamente. En este sentido, sólo Canadá, país que se toma "muy en serio" su minería, asume regularmente los problemas derivados de esta cuando no hay más remedio (p.ej., quiebra económica de una empresa minera). Como dice un dicho español, *hay que estar a las duras y a las maduras*.

Finalmente, con la misma diligencia con que se cobran los impuestos y royalties mineros, también las autoridades deberían asumir los costes ambientales derivados de una minería que en su época, y debido a la carencia de una legislación ambiental, fue poco cuidadosa con el entorno.

Bibliografía

Atención: *Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.*

Faulkner, B.B. y Skousen, J., 1995. Effects of land reclamation and passive treatment systems on improving water quality. Green Lands, 25, 34-40.

Flores y Plantas, 2010. *Typha latifolia*. Floresyplantas.net, Magazine on-line, http://www.floresyplantas.net/flores-plantas/plantas-acuaticas/typha-latifolia/

McCloskey, L., Bless, D. y US Department of Energy, 2005. Prevention of Acid Mine Drainage Generation from Open-pit Highwalls—Final Report. Mine Waste Technology Program Activity III, Project 26, http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r05060/600r05060.pdf

Skousen, J., 1998. Overview of passive systems for treating acid mine drainage. West Virginia University, Extension Service, http://www.wvu.edu/~agexten/landrec/passtrt/passtrt.htm

US EPA, 2011. West Virginia: Cheat River. Water: Nonpoint Source Success Stories, http://water.epa.gov/polwaste/nps/success319/wv_che.cfm

Fuentes de las imágenes (a Noviembre de 2011)

1. http://www.wvu.edu/~agexten/landrec/passtrt/passtrt.htm
2. http://www.crl.co.nz/research/MDframework_appF.asp

La integración paisajística de escombreras

Las escombreras tienen su principal problemática en el diseño inicial. Cuando éste es adecuado, se procura evitar su impacto visual, ya sea por localización, o por integración paisajística. Los criterios de localización serán los que eviten que la escombrera sea vista desde las zonas pobladas o de tránsito, y esto solo será posible si la zona tiene una cierta orografía. La integración paisajística a menudo requiere una topografía abrupta, puesto que en zonas llanas pretender la integración supone aplanar mucho la escombrera, afectando a una extensión de terreno mucho mayor. Un parámetro vital a considerar es el del aislamiento físico-químico, que evite los problemas de dispersión de contaminantes químicos por lixiviación y posterior transporte, por infiltración o por escorrentía. No obstante, el principal problema lo suelen plantear las escombreras ya existentes, emplazadas y construidas sin criterios ambientales.

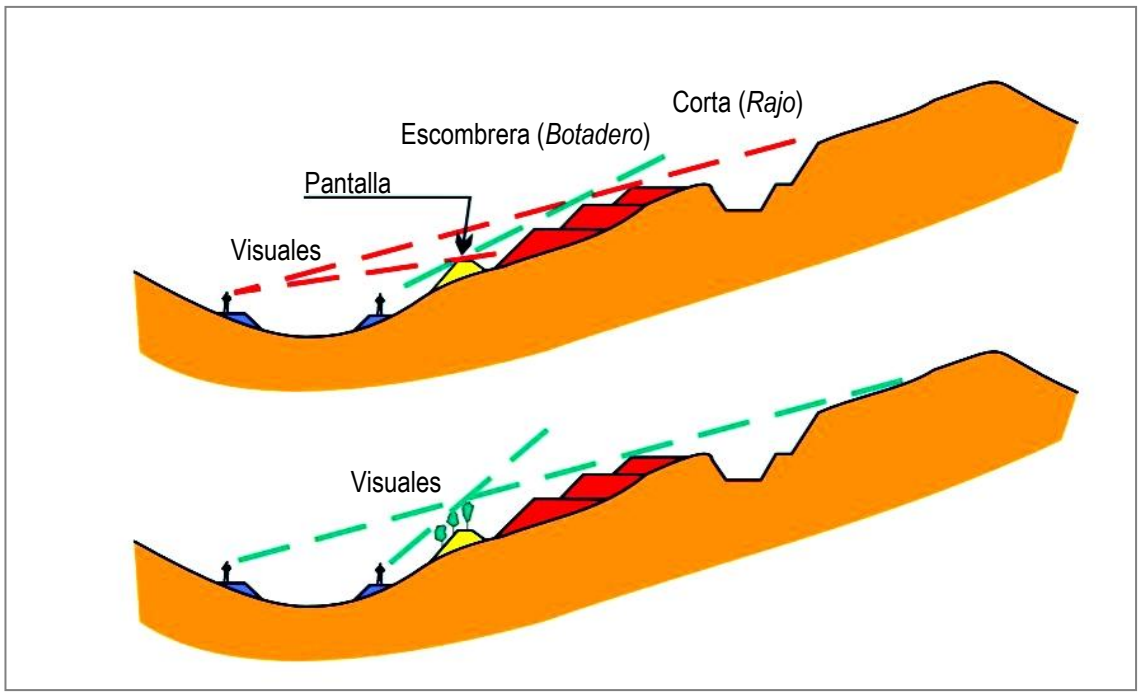


Escombrera en el Distrito Minero de Leadville (Colorado) con drenaje ácido; ver también al respecto el Anexo 1 (imagen[1]).

Así, desde el punto de vista morfológico la escombrera minera debe cumplir dos criterios fundamentales: 1) quedar integrada en la medida de lo posible en el paisaje; y 2) evitar el transporte de sus productos y lixiviados (ver Anexo 1 para esta materia).

Lo que se refiere a la integración paisajística, esta pasa por varias posibilidades:

Ocultación de la escombrera. Consiste en evitar la visión de la misma desde los puntos o áreas más significativos, como pueden ser poblaciones, carreteras, etc. Para esto puede aprovecharse la naturaleza del terreno, vaguadas, resaltes, etc., o pueden construirse pantallas o barreras, ya sean de vegetación o de materiales de acopio. Normalmente esta posibilidad se aplica en el diseño de escombreras nuevas, puesto que en escombreras ya existentes y de cierto tamaño puede ser mucho más costoso de llevar a cabo ya que implica su traslado.

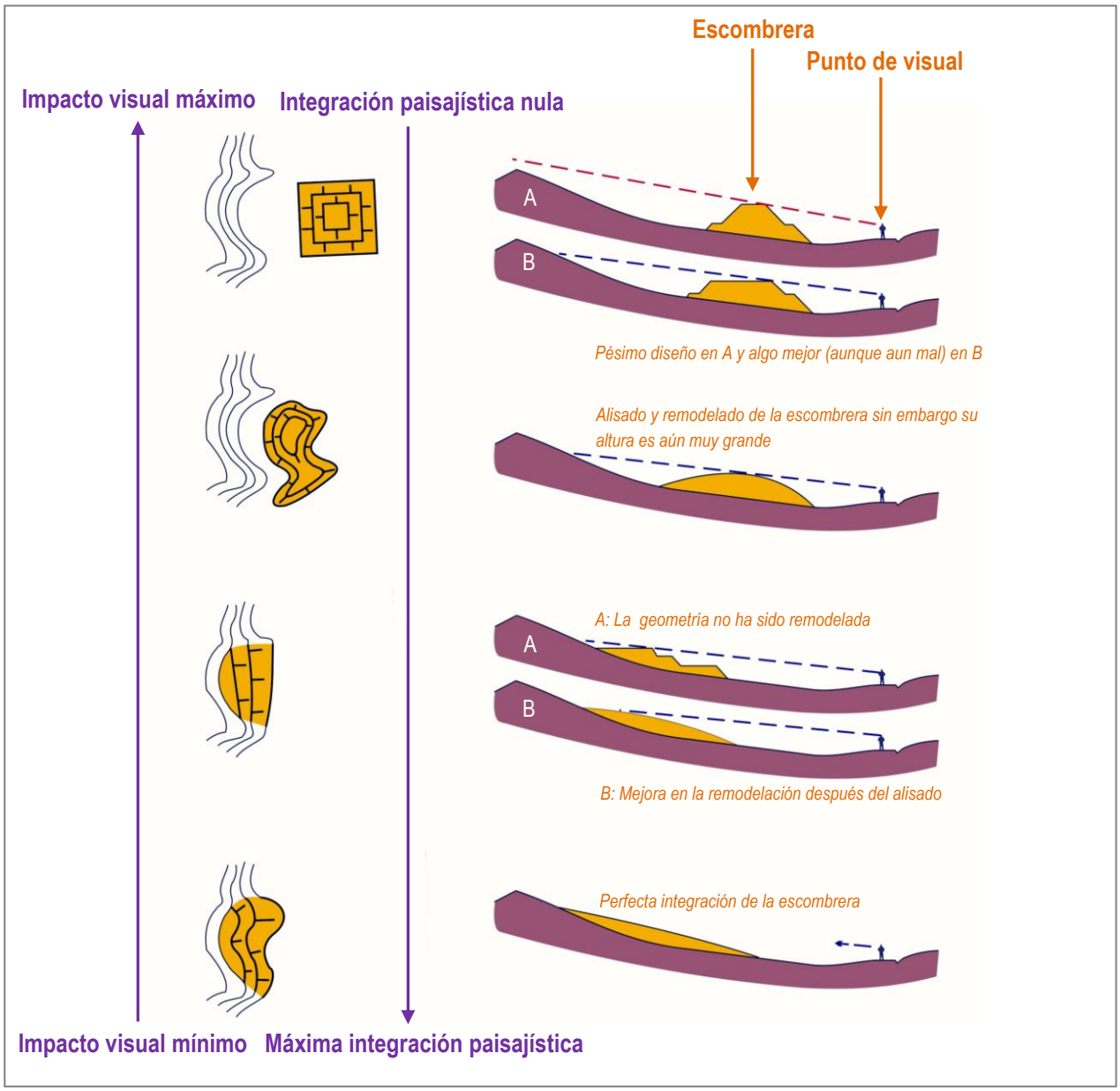


Ocultación de escombrera mediante una pantalla de tierra (arriba) y mediante una combinación de pantalla de tierra y de vegetación (abajo).

Remodelado de la escombrera. Se aplica en escombreras antiguas que producen un importante impacto visual. Algunas reglas visuales al respecto son las siguientes:

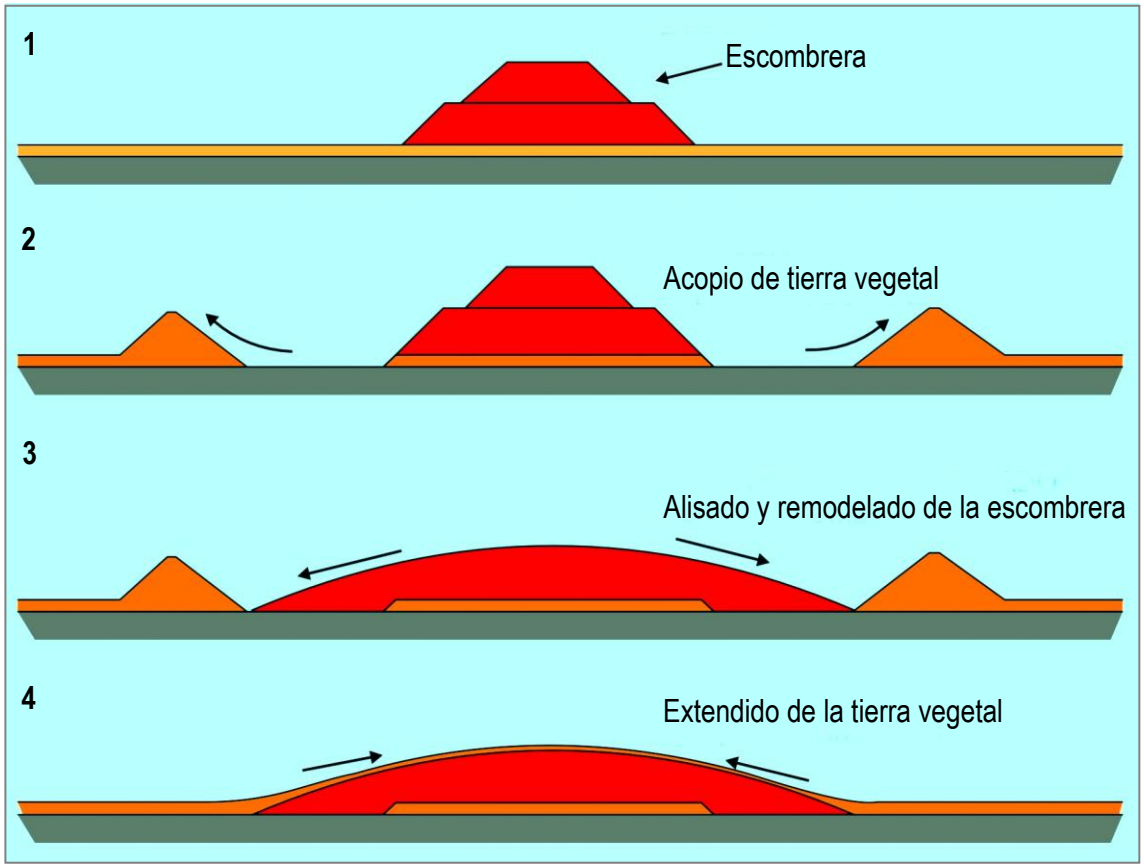
- La vista percibe más las dimensiones verticales que las horizontales, por lo que impactará menos una masa alargada y de poca altura que otra estrecha y alta.
- La distribución del material sobre una ladera en pendiente hace que en la parte más alejada del espectador se aprecie una menor masa aparente.
- Se debe evitar que la altura de la escombrera sobrepase la cota altitudinal del entorno, para que así no destaque en la línea del horizonte.
- Las líneas curvas sobre superficies suaves producen una intrusión visual menor que las líneas y cortes rectos sobre superficies planas, las cuales no hacen sino acentuar formas y volúmenes.

- En terrenos abruptos el efecto visual disminuye si las escombreras se apoyan en laderas, y si se reproducen en lo posible las pendientes, formas y líneas naturales del terreno.
- Las litologías con colores fuertes y llamativos (por ejemplo, intensos recubrimientos con limonitas) intensifican y agravan las sensaciones ópticas del observador, al contrastar con el colorido suave y vistosidad natural de los suelos y vegetación (p.ej., regiones mediterráneas).
- Por lo tanto, resulta fundamental identificar los rasgos característicos del entorno, de forma que la integración sea lo más positiva posible, tanto en el caso de la ocultación como del remodelado. Todo esto con el fin de reproducir la forma natural de las estructuras geomorfológicas para alcanzar la máxima integración.



Integrando escombreras en el paisaje.

Una de las actuaciones más frecuentes en el modelado de escombreras es la reducción de su altura, que como ya se ha mencionado, es uno de los caracteres de mayor impacto. Eso implica siempre un aumento de la superficie afectada, por lo que la remodelación debe llevarse a cabo retirando previamente la tierra vegetal del área a afectar, que se extenderá sobre el conjunto resultante al término del proceso.



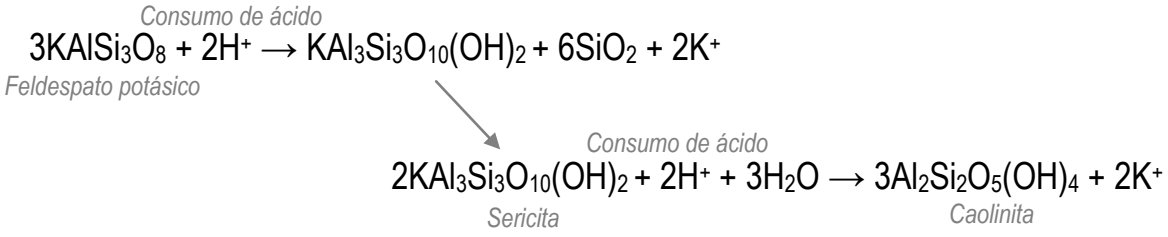
Los pasos a seguir durante una operación de remodelado de escombrera (1 a 4). Huelga decir que esto será aplicable solo si "efectivamente" existe tierra vegetal o equivalente. De otra manera con el alisado y remodelado geométrico de la escombrera bastará.

Fuente de la imagen (a Noviembre de 2011)

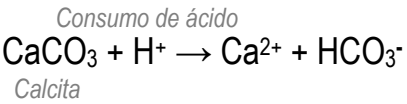
1. http://gaussling.wordpress.com/2009/08/09/the-gangues-of-leadville/

Cuando "puede" que los problemas no sean "tan" graves

Por la misma razón que existen circunstancias naturales "agravantes" para los impactos de la minería, también existe lo opuesto. Dado que la tendencia natural es a fijarnos más en los problemas que en las soluciones, aquí enumeraremos una serie de atenuantes naturales para los impactos de la minería. En otras palabras, solo tenemos que pensar en el hecho que agrava un fenómeno para encontrar su atenuante. Por ejemplo, podemos decir sin temor a equivocarnos que el drenaje ácido de mina será muy intenso en aquellos yacimientos que han sufrido alteración argílica avanzada, esto es, donde los feldespatos de la roca se han hidrolizado y por lo tanto no están ahí para reaccionar con el ácido sulfúrico derivado de la oxidación de la pirita. Si la clave son los feldespatos de la roca, entonces aquellas rocas volcánicas o plutónicas que los conserven, tendrán una capacidad intrínseca de neutralización del ácido → la solución ácida reaccionará con el feldespato hidrolizándolo, lo que lleva a un consumo de hidrogeniones y por lo tanto se tenderá a una neutralización del drenaje ácido (Oyarzun et al., 2007, 2010):



Mejor aun si hablamos de una roca carbonatada como una caliza:



Lo mismo se aplica a tantos otros impactos que en condiciones naturales favorables se ven minimizados. Qué duda cabe que las fuertes lluvias debilitan la cohesión de un macizo de roca y más aun, de los materiales disgregados. Por lo tanto, un clima árido o hiperárido (p.ej., Desierto de Atacama) favorecerá la estabilidad de una pila de residuos. De esta manera, en la siguiente página presentamos una tabla que resume actividad por actividad minera, sus potenciales impactos naturales y como "algunos" pueden ser mitigados por las propias condiciones naturales del entorno geológico o climático.

Acción	Problemas Ambientales	Atenuantes Naturales
Minería a cielo abierto	• Fuerte impacto visual en el caso de las canteras explotadas en laderas de montañas. Impacto menor si es una corta (*rajo*) desarrollada por debajo de la cota media. • Graves problemas por la inmensa acumulación de residuos en escombreras (*botaderos*), particularmente en regiones montañosas y lluviosas. • Formación de drenaje ácido en las escombreras. • Probable formación de un lago de drenaje ácido interior una vez cesada la actividad minera. • Contaminación de las aguas subterráneas.	• La ausencia de sismicidad importante y clima árido contribuyen a una mayor estabilidad de las escombreras. • Si la roca encajante son calizas el problema de drenaje ácido se mitiga considerablemente. Lo mismo se aplica si las rocas ígneas conservan los feldespatos.
Minería subterránea	• Potenciales colapsos localizados del terreno en superficie una vez cesada la actividad minera. • Formación de drenaje ácido. • Contaminación de las aguas subterráneas.	• Si la roca encajante son calizas el problema de drenaje ácido se mitiga considerablemente. Lo mismo se aplica a las rocas ígneas que conservan los feldespatos
Voladura de rocas y tráfico de vehículos	• Generación de polvo.	• Problema menor en regiones de clima lluvioso.
Flotación	• Formación de grandes volúmenes de colas acumuladas en balsas (*relaves*). • Inestabilidad de las balsas. • Potencial formación de drenaje ácido en las balsas.	• La ausencia de sismicidad importante y clima árido contribuyen a una mayor estabilidad de la balsa. • Si los materiales y/o la ganga son carbonatados el problema de drenaje ácido se mitiga considerablemente. • Suelos carbonatados neutralizarán las soluciones ácidas e impedirán un desarrollo en profundidad del problema.
Fundición	• Escape a la atmósfera de SO_2. • Escape de particulado aéreo.	
Lixiviación en pila 1: Acida	• Rotura en la base impermeable de una pila e infiltración de la solución ácida al subsuelo. • Dispersión de aerosoles	• Si las soluciones pasan al suelo de la base de la pila y este es calcáreo, la solución se neutralizará.
Lixiviación en pila 2: Cianurada	• Rotura en la base impermeable de una pila e infiltración de la solución cianurada al subsuelo. • Rotura de un dique de contención de las soluciones cianuradas. • Dispersión de aerosoles	• Corta vida del cianuro (CN^-) en la naturaleza, el cual se degrada a NH_4^+ y CO_3^{2-}.

Atenuación "natural" de algunos impactos ambientales generados por la minería.

Bibliografía

Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzun, J., Maturana, H. e Higueras, P., 2007. Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion - contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. Environmental Geology, 53, 283-294.

Oyarzun, R., Higueras, P., Lillo, J., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2010. Investigando temas minero-ambientales en el norte de Chile: más allá de los megaproyectos, la investigación formateada y la retórica ambientalista. Tierra y Tecnología, 37, 81-90.