

Artículos

Minería y aguas ácidas: contaminación y prevención

* Alicia Kirschbaum y ** Jesica Murray

* IBIGEO-CONICET, Museo de Ciencias Naturales y Facultad de Ciencias Naturales-UNSa.

** IBIGEO-CONICET, Museo de Ciencias Naturales-UNSa.

Procesos generadores de drenaje ácido de mina, el principal problema ambiental causado por la actividad minera en yacimientos de sulfuros. Algunas recomendaciones para su prevención.

La minería es el primer eslabón en la cadena de producción de muchos de los productos que diariamente utilizamos para vivir (casas, edificios, caminos, electrodomésticos, computadoras, automóviles, etc.), por lo que el desarrollo de las sociedades ha requerido y requiere de la utilización de variadas materias primas que se obtienen de la explotación de yacimientos minerales.

CUADRO 1:

Un *mineral* es una sustancia inorgánica natural sólida formada en la corteza terrestre que posee una composición química característica y una disposición atómica ordenada (Klein y Hurlburt, 1997). Un gran conjunto de minerales son explotados por el hombre para su aprovechamiento. Son recursos naturales no renovables producto de ciclos naturales, están asociados al ciclo de las rocas. Algunos minerales como la sal, el azufre y en algunos casos los áridos (arenas) son renovables, por ejemplo la sal se cosecha todos los años, en los ríos la arena naturalmente vuelve a depositarse.

CUADRO 2:

Los *metales* se encuentran en la naturaleza como elementos nativos como el oro (Au), la plata (Ag), el cobre (Cu), o formando parte de minerales metalíferos. Los minerales metalíferos que contienen la mayoría de los metales son los sulfuros y los óxidos, llamados así por que tienen, respectivamente, azufre (S) y oxígeno (O) en su composición. Por ejemplo: el sulfuro de plomo (Pb) o galena (PbS), el sulfuro de cinc (Zn) o esfalerita (ZnS), los sulfuros de cobre como calcopirita (CuFeS₂), bornita (CuFeS₄), covelina (CuS) y calcosina (Cu₂S), de molibdeno (Mo) o molibdenita (MoS₂) y los óxidos, de cobre o cuprita (Cu₂O), de hierro (Fe) o magnetita (Fe₃O₄). El oro también puede estar en teluros de oro, y la plata en sulfosales de plata.

En el léxico geológico-minero de los yacimientos metalíferos se denomina mineral de mena a aquellos minerales de los que se extrae uno o más metales y mineral de ganga a los minerales del yacimiento que acompañan a la mena pero que no tienen interés económico. Por ejemplo menas de cobre son la calcopirita (CuFeS₂), bornita (CuFeS₄), covelina (CuS) y calcosina (Cu₂S); mena de plomo la galena (PbS); mena de cinc la esfalerita (ZnS) y minerales de ganga comunes son el cuarzo (SiO₂) y la pirita (Fe₂S). Estéril: Corresponde a las rocas que no contienen mineral o lo contienen en cantidades mínimas, no rentables.

Los minerales en su estado natural permanecen en la corteza terrestre hasta que son descubiertos, al extraerlos se modifican las condiciones naturales y esto produce impactos ambientales negativos entre los cuales la generación de aguas ácidas en determinados tipos de yacimientos es uno de los más importantes. Nos referiremos en este artículo a los yacimientos de minerales metalíferos sulfurados.



Figura 1. Yacimiento Farallón Negro (plata y oro), Catamarca, Argentina. A. Interior de mina, veta con plata y oro en ganga de manganeso, roca de caja volcánica, ancho de veta 30 cm. B. Galería subterránea. C. Vista alejada de veta mineralizada con plata y oro. En el cuadrante inferior izquierdo se observa el ingreso a la labor subterránea. Fotos: Natalia Salado Paz.

Tipos de yacimientos y metodologías de explotación

Se denomina depósito mineral a una concentración anómala (superior a la media) de minerales en la corteza terrestre; cuando el depósito es económicamente explotable se lo denomina yacimiento y cuando comienza a explotarse se lo llama mina. Existen distintos tipos de yacimientos, por un lado, aquellos de donde se extraen **minerales industriales, rocas de aplicación y áridos** (fluorita, cuarzo, mica, arcillas, arenas, gravas, basaltos, granitos, calizas, mármol, sal, boratos, litio, hierro, etc.); los yacimientos de carbón también pertenecen a este grupo. Por otro lado están los yacimientos de los que se obtienen **minerales metalíferos** (oro, cobre, plata, plomo, zinc, estaño, etc.).

La metodología de explotación de un yacimiento y el diseño de la mina dependerán de la naturaleza del depósito, es decir, si el mineral está concentrado o diseminado en la roca. En general, la extracción de minerales industriales es simple y se realiza en canteras a cielo abierto (calizas, granitos, micas), en la superficie de los salares (sal de mesa, potasio, litio, boratos), o en las primeras capas de los suelos (arcillas).

La explotación de los yacimientos de sulfuros es más compleja y la metodología varía de mina en mina. Cuando el mineral está *concentrado* se presenta en vetas, capas, lentes y/o filones (Figura 1A y C), aquí el método de explotación más frecuente es el subterráneo a través de galerías horizontales y chimeneas verticales que se dirigen en forma focalizada a extraer la mena (Figura 1B y C), un ejemplo de este tipo de mina es Farallón Negro, ubicada en la provincia de Catamarca, donde se explotan vetas ricas en minerales de plata y oro.

Cuando el mineral está *diseminado* (Figura 2A y B) en pequeñas venillas y/o poros de la roca, es decir pequeñas cantidades distribuidas en grandes volúmenes, el método de explotación consiste en extraer toda la roca para concentrar posteriormente el mineral. Dado los elevados volúmenes de material involucrado, este proceso se conoce como *megaminería*. En general, del 100% del volumen de roca extraída, sólo alrededor de un 1% es económicamente aprovechable (mena) y el resto pasa a formar parte de los residuos mineros. Aquí se realizan grandes excavaciones a cielo abierto en forma de anfiteatros denominados *open pit* (Figura 2C) y comúnmente, si la mineralización continúa en profundidad, se pasa al método de explotación subterráneo.

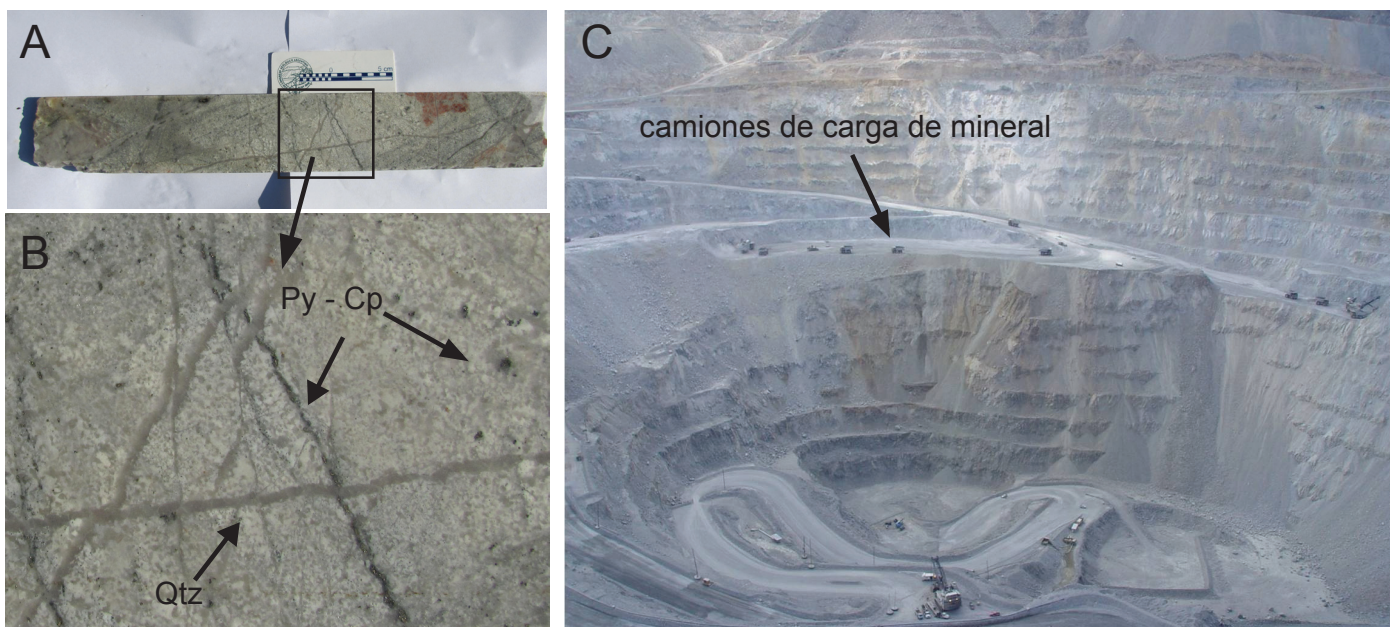


Figura 2. Yacimiento diseminado. A. Testigo de roca de una perforación en depósito de cobre y molibdeno en la provincia de Salta, muestra la mineralización diseminada en pequeñas vetillas (stockwork), escala de 5 cm. B. Detalle del testigo, vetillas y granos con pirita (Py), calcopirita (Cp) (mena) y vetillas con cuarzo (ganga). Fotos, gentileza Natalia Salado Paz. C. Open pit mina Bajo la Alumbrera, <http://www.alumbrera.com.ar>

Yacimientos metalíferos, proceso de beneficio y desechos mineros

Durante la explotación, se extraen los minerales de mena que siempre están acompañados en mayor o menor medida de ganga. Por lo tanto, luego de su extracción se implementan sistemas de beneficio para separar el mineral de interés del resto y posteriormente extraer el metal. Existen diferentes técnicas, pero generalmente en las operaciones mineras se realizan molienda y flotación. Para ello, las menas que se extraen de la mina primero pasan por molinos donde se reduce su tamaño a finas partículas y luego se mezclan con reactivos que capturan los elementos metálicos de interés por medio de flotación, obteniendo una pulpa rica en metales que luego es refinada o vendida directamente como concentrado de metales. El residuo o cola de este proceso de beneficio está compuesto principalmente por partículas finas de ganga, estéril, muy pequeñas cantidades de mena que escapan del proceso de beneficio, reactivos residuales y el agua utilizada; éstos se depositan en diques que se construyen en proximidades a la mina y que generalmente abarcan grandes superficies en el terreno (dique de colas).

Las rocas extraídas de la mina que no van al proceso de beneficio porque tienen baja concentración o no tienen metales de interés, son acumuladas en montículos denominados escombreras. Las escombreras y los diques de colas forman parte de los desechos mineros y junto con el *open pit* y/o los laboreos subterráneos son las principales fuentes de generación de aguas ácidas y contaminación cuando el agua de lluvia y el agua subterránea toman contacto con ellos.

El agua y la minería

La minería es una actividad que requiere agua en la mayoría de las etapas de su producción pero específicamente en la etapa de beneficio, donde el agua se utiliza para facilitar la molienda de la roca y en los tanques de flotación para separar el mineral con los reactivos de flotación en medio acuoso. Luego, el agua es depositada en el dique de colas junto con los residuos del proceso, en general gran parte es bombeada y reutilizada en el mismo. La escala de la mina, de la planta de beneficio y el volumen de roca que ingresa para ser procesado definirán el volumen de agua necesaria, variando de un yacimiento a otro.

La minería es cuestionada debido a la utilización de grandes volúmenes de agua, en especial en regiones con escasos recursos hídricos donde la competencia por el uso del agua entre la agricultura y la minería es fuerte. Se conocen ejemplos de ello en Argentina: los casos de las minas Pascua-Lama y Veladero en la provincia de San Juan y de mina Alumbra en Catamarca.

En general las minas se encuentran en zonas altas de cabecera de cuenca, lo que implica riesgos de contaminación del recurso hídrico y su inutilización para las poblaciones que dependen del mismo. Existen proyectos mineros económicamente interesantes pero que resultan inviables debido a la oposición de las comunidades locales, que ven peligrar la calidad del recurso o que se oponen a la minería por rechazo a esta actividad. Se puede mencionar el caso de Esquel (2003) y del yacimiento Agua Rica (2009-2010) en la provincia de Catamarca, ubicado en la cabecera del río Potrero que atraviesa la localidad de Andalgalá.

La generación de aguas ácidas

Está directamente relacionada a los depósitos de sulfuros y de carbón, ya que ellos poseen minerales metalíferos que en contacto con las condiciones atmosféricas generan acidez en el agua natural, denominado drenaje ácido. Este proceso se da cuando los sulfuros toman contacto con el agua y el oxígeno, alterándose y liberando los elementos que los componen; estos elementos interactúan con las moléculas de agua (H_2O) produciendo su ruptura y la liberación de protones (H^+), que una vez en el agua son los que producen la acidez.

CUADRO 3:

El pH es un parámetro muy utilizado para expresar la acidez del agua ya que tiene en cuenta la concentración de protones. La escala de pH va de 1 a 14, agua con pH = 7 es neutra, por debajo de 7 es ácida y por arriba es básica. Su fórmula química es: $pH = -\text{Log}(H^+)$ y se obtiene a través de mediciones en el agua con un peachímetro.

Drenaje ácido natural o drenaje ácido de roca (DAR): Es el aumento de la acidez del agua natural al estar en contacto o atravesar zonas con mineralizaciones metalíferas expuestas a la oxidación atmosférica, sin que haya una mina en actividad. Por ejemplo, cuando el agua de un arroyo o el agua subterránea atraviesa rocas con vetas mineralizadas o sulfuros diseminados. En muchos casos el agua ácida puede neutralizarse en su recorrido por estar en contacto con otras rocas, sedimentos fluviales y suelos de la región.

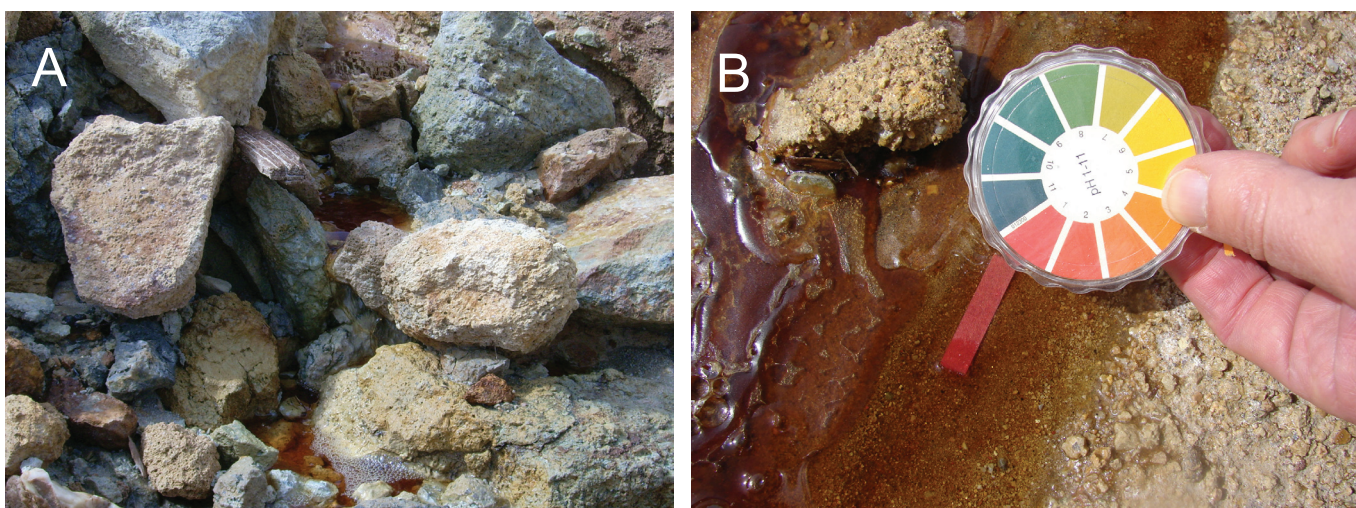


Figura 3. A. Drenaje ácido de mina en escombrera de la mina abandonada Pan de Azúcar, Jujuy. El color rojo se debe al hierro y otros metales en solución. B. pH del agua < 2, cinta colorimétrica para medición de pH, cada color indica un valor de pH, el color rojo pH = 1 y el azul pH=11. Fotos: Marcelo Arnosio.

Drenaje ácido de mina (DAM): es la acidificación del agua superficial y subterránea en una mina al estar en contacto con minerales metalíferos en las labores mineras, diques de colas y/o escombreras (Figura 3). La actividad minera causa fragmentación (permeabilidad secundaria) en las rocas y aumenta la superficie específica de contacto entre las rocas, el aire y el agua. El mineral que mayor capacidad de generar drenaje ácido tiene es el sulfuro de hierro o pirita (Fe_2S).

La pirita es abundante y común en los yacimientos metalíferos y de carbón; como no tiene valor económico, pasa a formar parte de los desechos mineros concentrándose en las escombreras y diques de colas (Figura 4A). Allí constituye un potencial generador de drenaje ácido de mina.

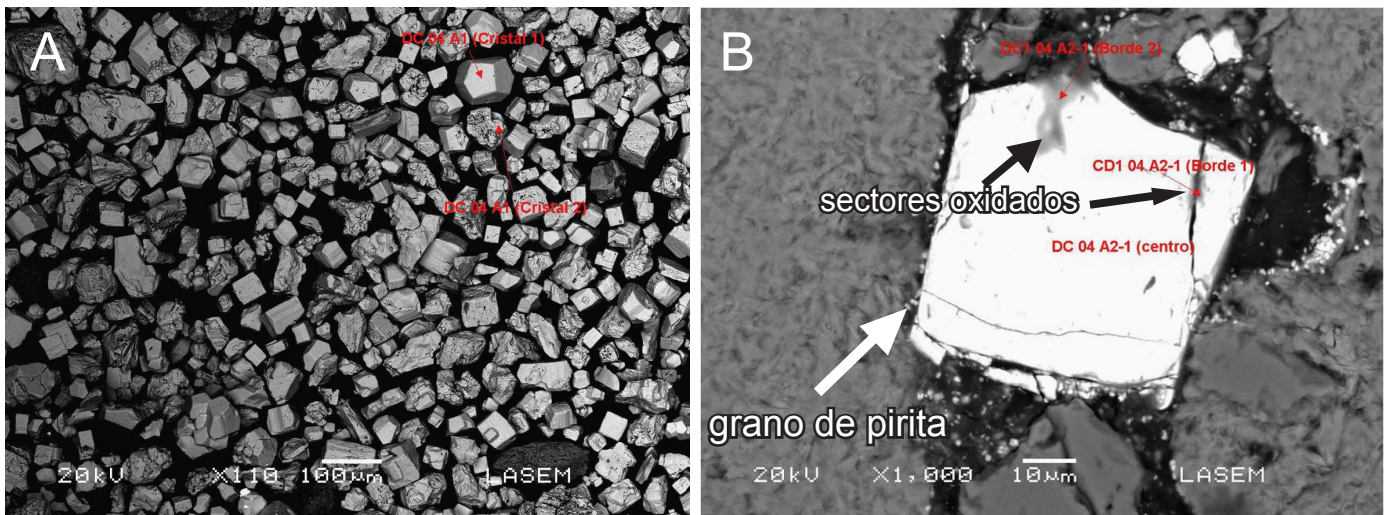
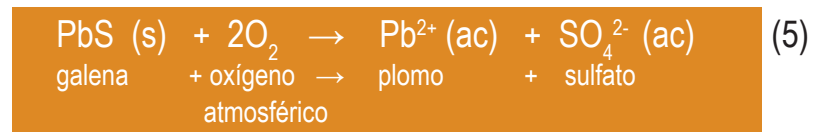
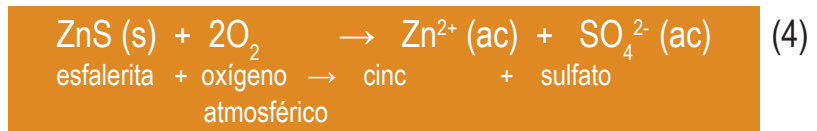
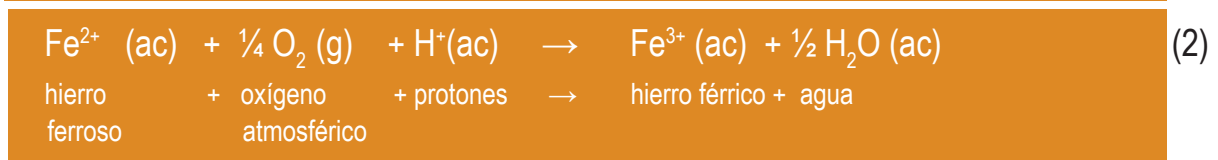
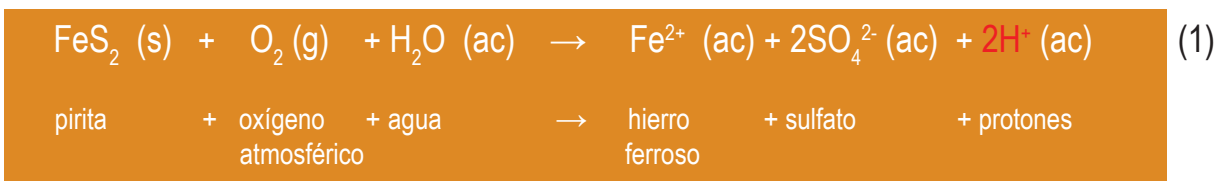


Figura 4. Granos de pirita (cúbica) y otros minerales metálicos extraídos del dique de colas abandonado de la mina Concordia, Salta. Imágenes de microscopio electrónico de la Universidad Nacional de Salta (LASEM). A. Granos cúbicos de pirita (DC 04 A1 (cristal 1 y 2)). B. Corte delgado donde se observa un grano de pirita con sectores oxidados (Borde 1 y 2) y centro inalterado (Tonda, 2010).

La alteración de este mineral se produce en distintas etapas, se presentan aquí las reacciones principales: (1) oxidación de azufre (S); (2) oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}); (3) oxidación de pirita por hierro férrico (Fe^{+3}), que es la que genera mayor acidez (Nordstrom, 1982; Dold, 2010).



Referencia: (s): sólido; (g): gas; (ac): en solución acuosa

Los demás sulfuros presentes en los yacimientos metalíferos también se alteran al igual que la pirita cuando toman contacto con el agua y el oxígeno, pero su potencial de generación de acidez es menor, como en el caso de la arsenopirita (FeAsS) y calcopirita (CuFeS_2). La esfalerita (ZnS) y la galena (PbS) al oxidarse no aportan acidez pero sí liberan plomo y cinc (ecuaciones 4 y 5), elementos peligrosos para el medio ambiente y la salud humana y que en el agua ácida son solubles.

Bacterias aceleradoras de los procesos de drenaje ácido

La generación de DAM se ve incrementada por la presencia de diversos microorganismos que sobreviven en ambientes ácidos y extremos como el de los residuos mineros. *Thiobacillus*, *Acidithiobacillus* y *Leptospirillum* son microorganismos que están presentes en los sedimentos de los diques de colas y escombreras y utilizan la energía que se libera de la oxidación del hierro para su metabolismo; estas bacterias tienen preferencia por los sulfuros que contienen hierro como la pirita. La reacción presentada en la ecuación (2) es acelerada por la actividad microbiana, lo que incrementa la producción de DAM (Nordstrom, 1982; Nordstrom y Southam, 1997; Dold, 2010).

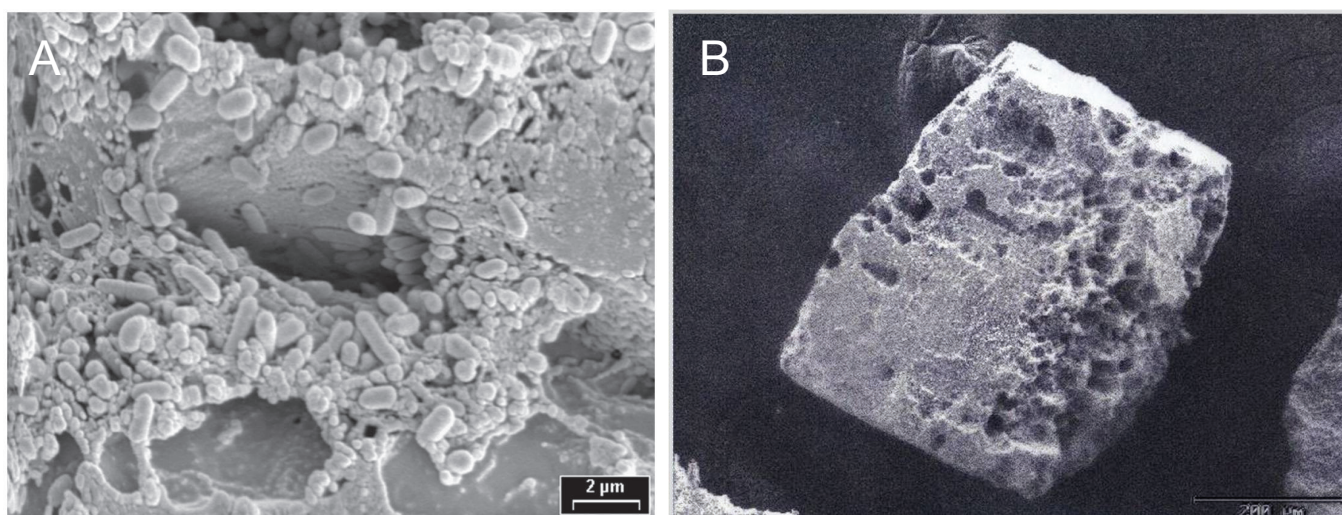


Figura 5. Imágenes de microscopio electrónico. A. *Acidithiobacillus thiooxidans* sobre grano de pirita. B. Grano de pirita luego de ser atacado en laboratorio durante cinco meses por microorganismos. Gentileza del Dr. Edgardo Donati, Universidad Nacional de La Plata.

¿Por qué el DAM es peligroso?

En general los elementos metálicos como plomo (Pb), cinc (Zn), cadmio (Cd), cobre (Cu), arsénico (As), etc., tóxicos por encima de ciertas concentraciones, son solubles en aguas ácidas. La acidificación del agua al estar en contacto con los desechos mineros la convierte en una sustancia capaz de poner y mantener en solución dichos elementos y transportarlos mientras se mantengan las condiciones de acidez. Por esta razón los arroyos y aguas subterráneas ácidos generados en las minas constituyen un riesgo ambiental ya que pueden transportar metales aguas abajo afectando diversos ecosistemas e inutilizar el agua para otros usos.

Pasivos mineros en el Noroeste Argentino y legislación ambiental

En el noroeste argentino existen explotaciones mineras subterráneas de sulfuros primarios abandonadas hace alrededor de veinte años sin un adecuado cierre de mina, constituyendo *pasivos ambientales mineros*. Las minas cesaron su actividad a mediados de la década del '80 ya que por disminución en el precio de los metales o por agotamiento de las reservas bajó su rentabilidad. Las minas a las que se hace referencia en este trabajo son Concordia (plomo, plata y cinc) (Figura 6) y planta de procesamiento La Poma (plomo y plata) en la provincia de Salta (Argañaraz et al., 1982) y Pan de Azúcar (plomo, plata y cinc) en la provincia de Jujuy (Segal y Caffè, 1999) (Figura 7). Los diques de colas y escombreras abandonados poseen minerales sulfurados (incluyendo pirita) y están expuestos al intemperismo, convirtiéndolos en fuentes generadoras de DAM. Estas minas y el volumen de sus desechos mineros son pequeños al comparar las dimensiones y volúmenes que maneja la minería actual, sin embargo, los estudios realizados desde el punto de vista ambiental indican un fuerte impacto negativo en el ambiente circundante generado por el DAM (Kirschbaum et al., 2007; Amosio et al., 2008). En la actualidad se continúa con los estudios en estos sitios, para comprender mejor el proceso generador de DAM y el ciclo de los metales puestos en solución. Esto será de utilidad para plantear estrategias de remediación e idear metodologías de prevención que puedan ser útiles para las presentes y futuras explotaciones mineras metalíferas en la región.



Figura 6. A. Vista panorámica de la mina abandonada Concordia, provincia de Salta, se observa que el arroyo Concordia atraviesa los diques de colas. B. Escombrera, compuesta por fragmentos de roca de diferente tamaño. C. Diques de cola disectados por el arroyo Concordia. Fotos: Marcelo Amosio. D. Muestra de mineral de mena de plomo (galena PbS) que se extraía de las vetas de la mina. Foto: Natalia Salado Paz.

En el momento de cierre de estas minas la legislación nacional vigente (Código de Minería) no contemplaba acciones para el resguardo del medio ambiente. En la actualidad, la incorporación de la Ley Nacional 24.585 de Protección Ambiental en Materia Minera (año 1995) aumenta las exigencias para el resguardo del medio ambiente en cada etapa del proyecto minero, sin embargo no es explícita al reglamentar el cierre de mina.

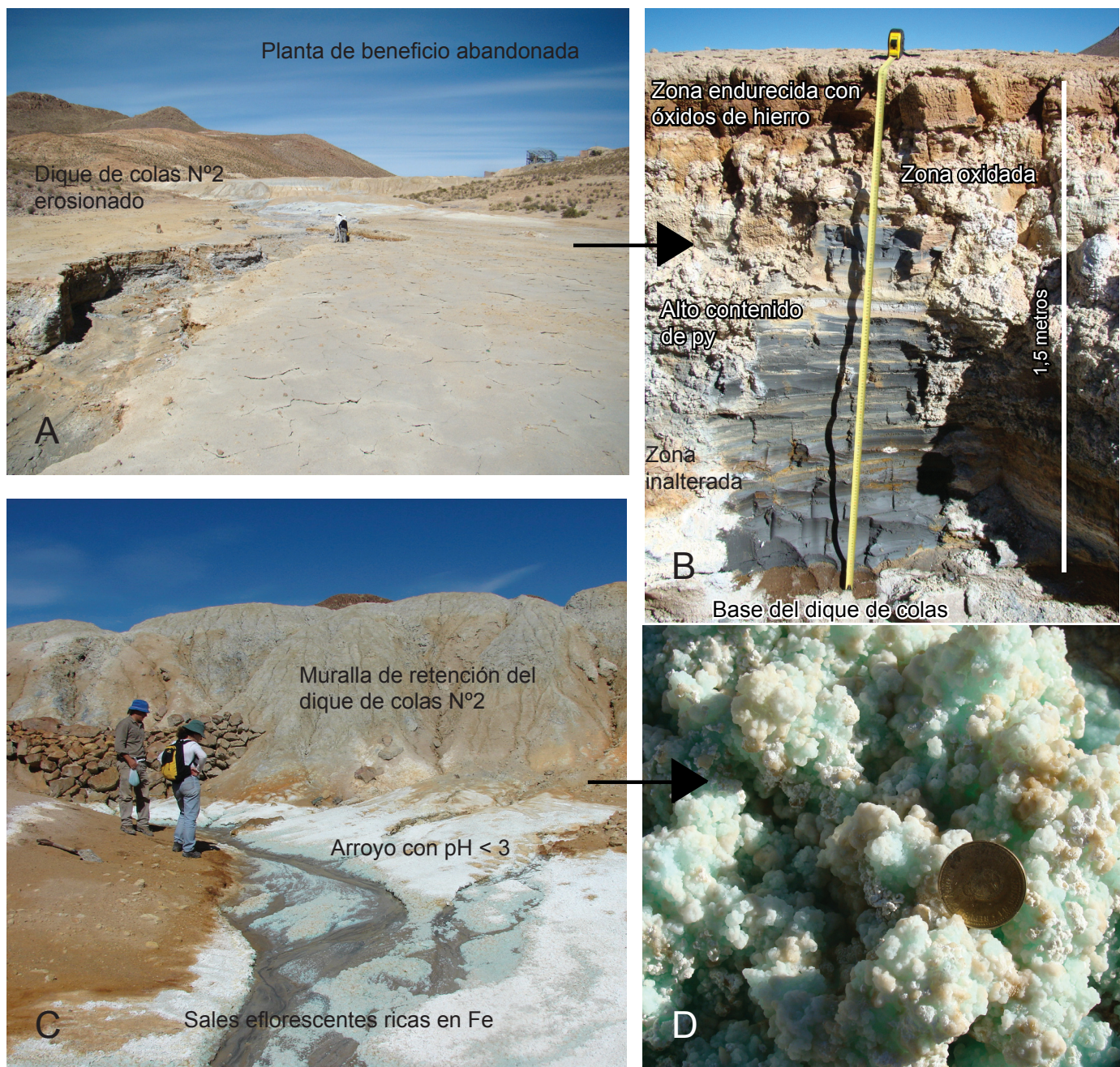


Figura 7. Mina abandonada Pan de Azúcar, provincia de Jujuy. A. Dique de colas N°2, surcos generados por la erosión hídrica en la época de lluvias (verano). B. Perfil del dique luego de 20 años de abandono, el proceso de alteración comienza en las primeras capas y continúa en profundidad, es lento debido al fino tamaño de las partículas que no permite la infiltración del agua de lluvia, la parte superior está fuertemente oxidada y la inferior aún posee desechos inalterados. En la parte inferior se observa el contacto con el sustrato compuesto por sedimentos naturales del valle donde se depositaron las colas del proceso de beneficio. C. Muralla de retención deteriorada del dique de colas N°2 construida con fragmentos de rocas del lugar. Se observa el arroyo que surge de la base del dique con $\text{pH} < 3$. La aridez del clima produce precipitación de sales eflorescentes. D. Melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), de color celeste y rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) de color blanquecino-amarillento, comunes en los ambientes mineros con problemas de drenaje ácido. Fotos: Marcelo Arnosio, Alicia Kirschbaum y Jessica Murray.

Prevención de DAM, planes de cierre de mina y remediación de pasivos mineros

Los estudios realizados en numerosas minas en otros sitios del mundo muestran que los efectos negativos de los desechos mineros en contacto con la atmósfera en general no son evidentes cuando se cierra una mina, sino que comienzan a aparecer tiempo después y pueden perdurar por décadas e incluso siglos (Coggans, 1992). La prevención y remediación del drenaje ácido es más complicada una vez cerrada la mina que cuando está en actividad y los efectos de la contaminación se distribuyen por grandes áreas a través de los acuíferos y/o arroyos y ríos, lo que implica altos costos y dificultades técnicas para la recuperación de los recursos (principalmente agua y suelo) deteriorados.

Para evitar o disminuir la generación de DAM y sus consecuencias, debe realizarse un detallado estudio y planificación del cierre de la mina y disposición final de los residuos mineros en las etapas tempranas de cada yacimiento cuya explotación sea autorizada. El plan de cierre luego debe ser actualizado y fiscalizado por las autoridades de aplicación durante la explotación y a medida que se incrementa el conocimiento de los materiales que se extraen de la mina. De esta manera, no sólo se asegura una mejor disposición final de los residuos y la implementación de técnicas para prevenir el DAM, sino que se reducen los costos de cierre de mina cuando cesa la operación (Paulino et al., 2010).

Las características climáticas, hidrológicas, estructurales, mineralógicas y geoquímicas del yacimiento y la mineralogía y microbiología de los residuos mineros definirán el método más adecuado para lograr su correcta disposición final.

Existen diferentes técnicas de disposición de residuos y de cierre de mina, su eficiencia depende básicamente de las condiciones climáticas, de las características de la mina, del dinero invertido y del esfuerzo e inteligencia humana que se conjuguen para evitar que surja el problema. Son comunes los métodos de coberturas de las escombreras con capas de sedimentos de diferente granulometría para aislarlas de la atmósfera y la adición de materiales neutralizadores (caliza). En climas lluviosos donde abunda el agua, se estabilizan los diques de colas a través de construcción de humedales artificiales sobre ellos, allí las condiciones anaerobias no permiten la oxidación de los sulfuros, por lo tanto se inhibe la generación de acidez en el agua y la solubilización de metales. Más complicada es la implementación de técnicas para evitar la infiltración y circulación de agua en las labores subterráneas cuando las operaciones mineras cesan, una de las posibilidades es mantener sistemas de bombeo permanentes. De la misma manera, resulta complicado encontrar metodologías para aislar de modo eficiente la superficie expuesta en los *open pit* y evitar la inundación y formación de lagunas en su interior que se tornan ácidas con el transcurso del tiempo. En algunas minas se llevan adelante proyectos de restauración de los sitios mineros que son utilizados por algunos de los habitantes de la región como atractivo turístico.

Es importante destacar que cada yacimiento minero es un caso particular y sus características son únicas, por lo que para cada uno debe idearse una técnica de disposición final de residuos y un plan de cierre que se adecue a las condiciones del lugar. Además es necesario que una vez realizadas dichas tareas, se implemente un **sistema de monitoreo constante y permanente** para controlar el sitio, dar aviso y efectuar acciones en caso de que no sean eficientes. Es aquí donde surge la disyuntiva sobre en quién cae la responsabilidad de dichos controles y remediaciones luego de que el mineral se extrae, la mina cierra y la empresa abandona el yacimiento si la legislación no es clara al respecto (Código de Minería y Ley Nacional N° 25. 585). En esta instancia, cabe mencionar que actualmente la Secretaría de Minería de la Nación lleva adelante un plan de gestión ambiental minera (GEAMIN), con fondos obtenidos de un préstamo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID 1865/OC AR) por \$25,6 millones de dólares, que incluye la recuperación de sitios mineros abandonados con serios problemas ambientales. Si bien esta medida es útil ya que pretende resolver problemas ambientales heredados de una época con escasa legislación medioambiental, incrementa la deuda externa nacional y no debería ser un modelo a repetir en el futuro.

La recuperación de sitios mineros abandonados y el saneamiento de los recursos naturales contaminados implican realizar detallados estudios hidrológicos, mineralógicos, geoquímicos y biológicos para caracterizar el proceso de contaminación y plantear la mejor metodología de remediación. En general las remediaciones demandan tiempo, dinero, esfuerzo y controles posteriores para corroborar si son realmente eficaces.

En Argentina, con grandes proyectos mineros en funcionamiento, con regiones donde la exploración minera es muy importante y donde la apertura de nuevas minas está en proceso, se deben rediscutir y mejorar las legislaciones y controles ambientales para poder asegurar un manejo socialmente responsable de las minas y sus desechos así como la implementación de planes de cierre de mina eficientes y confiables. La activa participación de las comunidades involucradas debe ser garantizada en todo el proceso. El ejemplo de cómo en otros países y regiones del mundo (COPAM N° 127, Estado de Mina Gerais en Brasil y Comisión Europea para el medio ambiente, Unión Europea) discuten y mejoran las legislaciones en este sentido, deben ser una fuente de consulta y aprendizaje.

Reflexiones finales

La problemática ambiental que acompaña a la explotación de los recursos minerales metalíferos implica que esta actividad debe ir acompañada de estudios interdisciplinarios detallados y estrictos controles para realizar el manejo y disposición final de los desechos mineros.

Los pasivos mineros presentes en el noroeste de Argentina ponen a la luz la necesidad de realizar modificaciones en las legislaciones y en los controles ambientales existentes a fin de asegurar una buena planificación y cierre de mina. En este sentido, el estudio de pasivos mineros ayuda a comprender los errores del pasado otorgando claves para un mejor manejo en el futuro.

Finalmente, mientras continúe el actual proceso de crecimiento y desarrollo de las sociedades, será necesaria una constante demanda de los recursos mineros que **debe ser controlada**. En este punto, el replanteo sobre cuáles y cuántos son los recursos necesarios para el desarrollo y cuáles y cuántos son los efectos e impactos causados en el medio ambiente merecen un debate profundo, teniendo en cuenta que la utilización de los recursos es indispensable para el modelo actual de desarrollo, pero que el desarrollo con altos costos ambientales no es sustentable. Acertar en la elección del rumbo definirá la calidad de vida de nuestra generación y las futuras.

Literatura citada y recomendada

Argañaraz RA, Sureda RA. 1979. El yacimiento plumbífero "La Esperanza", departamento de La Poma, provincia de Salta, República Argentina. Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología. Revista X: 1–11.

Argañaraz RA, Mancini JE, Sureda RJ. 1982. El Yacimiento La Concordia (Ag-Pb) en la provincia de Salta, Argentina: un proyecto privado de rehabilitación y explotación minera. V^{to} Congreso Latinoamericano de Geología, Argentina, Actas V: 61–78.

Amosio M, Kirschbaum A, Piccardo P, Vernuci M, Roman Ross G. 2008. El pasivo minero de Pan de Azúcar, Puna de Jujuy: caracterización geoquímica e implicancias ambientales (resumen). XVII Congreso Geológico Argentino, Jujuy, (II): 958–959.

Código de minería de la Nación y Ley nacional N° 24.585 - De la protección ambiental para la actividad minera.

COPAM (Mina Gerais State Council of Environment Policy). 2008. Deliberacao normativa Copam N° 127, Established guidelines and procedures for environmental assessment for mine closure phase, Belo Horizonte, 6p, <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8732>

Coggans CJ. 1992. Hydrology and geochemistry of the INCO Ltd., Copper Cliff, Ontario, mine tailings impoundments. Thesis. Univ. Waterloo, Waterloo.

Dold B. 2010. "Conceptos básicos de geoquímica ambiental sobre manejo de desechos mineros". In: Sunil Kumar (Ed.) "Waste Management", SCIYO.com open access publications. 173–198, <http://sciyo.com/books/show/title/waste-management>

EC (European Commission). 2009. Referente document on best available techniques for management of tailings and Waste-Rock in mining Activities, Seville, 511p.

Klein C, Hulburt CS. 1997. Manual de Mineralogía de Dana (4ª ed.) - Reverté S.A. Barcelona.

Kirschbaum A, Arnosio M, Menegatti N, Ribeiro Guevara S. 2007. Drenaje ácido de Mina La Concordia como fuente de contaminación del río San Antonio, Puna de Salta, Argentina. V Congreso Hidrogeológico Argentino, II Taller sobre Arsénico en Aguas: hacia una integración de las investigaciones. Galindo G, Nicolli H (compiladores) 53–59.

Tonda R. 2010. Estudio Mineralógico y Geoquímico del Pasivo Ambiental de Mina La Concordia, Departamento Los Andes, Puna Salteña: Salta, Argentina, Universidad Nacional de Salta, Tesis Profesional, 65 pp.

Nordstrom DK. 1982. Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Iron Minerals; en Acid sulfate Weathering. Kittrick JA, Fanning DS, Hossner L R (Eds.). Soil Science Society of America Spec. Pub. No. 10: 37–56.

Nordstrom DK, Southam G. 1997. Geomicrobiology of Sulfide Mineral Oxidation; en: Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals. Banfield JF, Nealson KH (Eds). Reviews in Mineralogy, 35: 361–390.

Paulino AM, Chapadeiro E, Pena AAS, Saliba APM. 2010. Closure Plan: a tool for mine management and cost savings. In: Mine Closure 2010, Viña del Mar. Fourie A, Tibbett M, Wiertz J (Eds). Australian Centre for Geomechanics, Perth.

Segal SJ, Caffè PJ. 1999. El grupo minero Pan de Azúcar, Jujuy. En: Recursos Minerales de la República Argentina. Zappettini EO, Ed. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1579–1592.

Secretaría de Minería de la Nación, Programa de gestión ambiental para una producción sustentable en el sector productivo:
<http://www.mineria.gov.ar/programadegestionambiental.htm>