

## Pasivos ambientales mineros en el noroeste de Argentina: aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales

**Alicia Kirschbaum<sup>1,2,\*</sup>, Jesica Murray<sup>1,2</sup>, Marcelo Arnosio<sup>1,3</sup>,  
Romina Tonda<sup>1</sup> y Lucía Cacciabue<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta,  
Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Bio y Geociencias del Noroeste Argentino IBIGEO-CONICET,  
Mendoza 2, 4400 Salta, Argentina.

<sup>3</sup> Instituto Geonorte, Universidad Nacional de Salta, Avenida Bolivia 5150,  
4400 Salta, Argentina.

\*alikir2003@yahoo.com.ar

### RESUMEN

*La Puna es una altiplanicie sobre elevada por encima de los 3700 m s.n.m. y ubicada en el extremo noroeste de Argentina. La severidad del clima impide un amplio desarrollo de suelos y vegetación. En esta región existen explotaciones mineras de sulfuros primarios abandonadas hace más de veinte años sin un plan de cierre de mina. Los diques de colas y escombreras de estos pasivos mineros poseen abundante pirita y están expuestos a la meteorización. Estos yacimientos constituyen hoy Pasivos Ambientales Mineros (PAM) que impactan negativamente en la calidad de las aguas, de los suelos y del aire de los ecosistemas que los contienen. En este trabajo se presentan los avances en el conocimiento de tres pasivos mineros del noroeste argentino, denominados La Concordia, Planta de Tratamiento La Poma y Pan de Azúcar. En cada sitio se estudiaron aguas superficiales, sedimentos, suelos y minerales secundarios. Los diques de colas fueron descritos estratigráficamente y se realizó en laboratorio un ensayo de caracterización físicoquímica de agua de poro. Los resultados obtenidos señalan que estos PAM constituyen fuentes de aporte de metales pesados en aguas, sedimentos fluviales y suelos de la región. El agua de lluvia que se infiltra en estos materiales promueve la oxidación de los sulfuros, disminuyendo el pH del sistema. Las eflorescencias salinas retienen los metales pesados actuando como receptoras temporales. La afectación al medio ambiente continuará en el tiempo hasta tanto no se tomen medidas de remediación y saneamiento de estos sitios.*

*Palabras clave: geoquímica ambiental, pasivos ambientales mineros, sistema Pb-Ag-Zn, drenaje ácido de minas, sales eflorescentes, Puna, Argentina.*

### ABSTRACT

*In northwestern of Argentina, the Puna region reaches 3700 m a.s.l. and is characterized by arid conditions with high temperature fluctuations and strong winds. In the Puna, there are primary sulfides mining exploitations that ceased their activity twenty years ago without a state-of-the-art closure plan. In the abandoned mines, waste rock and tailing impoundments are rich in pyrite and sulfide and are exposed to weathering, which negatively impacts the quality of water, vegetation, soil and air. Herein, we present*

*the results of the study of three abandoned mines from northwest Argentina: La Concordia, La Poma, and Pan de Azúcar. Superficial water, tailing sediments, soils, vegetation and efflorescent salts were sampled and analyzed. They show evidence of advanced Acid Mine Drainage process (AMD). Experimental data of analogue rain-water behavior show a fast pH drop, and dissolution of heavy metals, when water and tailing impoundment sediments are mixed. During the dry season, infiltrated water oxidizes the sulfide minerals in the tailings, and efflorescent salts precipitate from the tailings pore water capturing heavy metals, whereas in the raining season, salts are solubilized as well as some metals. The environmental damage will continue if remediation actions are not implemented.*

*Key words: environmental geochemistry, abandoned mines, Pb-Ag-Zn system, efflorescent salts, acid-mine drainage, Puna region, Argentina.*

## INTRODUCCIÓN

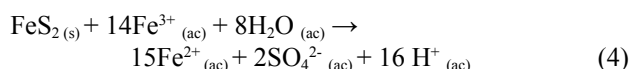
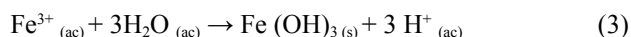
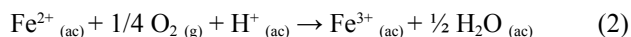
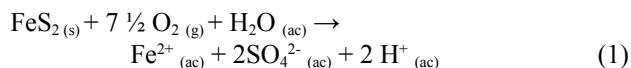
En Argentina no existe una definición precisa para el término *Pasivo Ambiental Minero (PAM)*. Algunos de los sitios mineros abandonados en donde se observan impactos ambientales de diferentes características y magnitud, son reconocidos como *pasivos ambientales* por la Secretaría de Minería de la Nación, dentro de su proyecto de Gestión Ambiental Minera. En este trabajo se utiliza el término *PAM* de acuerdo con la legislación peruana, que los define como: “instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad” (Ley N° 28.271, Artículo 2).

La explotación de minerales metalíferos constituye una actividad económica relevante en Latinoamérica desde la colonización española en el siglo XVI con un desarrollo discontinuo en Argentina. En el siglo XX, en el noroeste de Argentina se desarrollaron varios proyectos mineros, algunos de los cuales se mantienen en actividad hasta el presente (Mina Aguilar: Pb-Zn-Ag; Mina Piquitas: Ag-Sn-Zn), mientras que otros suspendieron su actividad a mediados de la década de 1980, dejando abandonadas las labores e instalaciones y expuestos a la meteorización escombreras y diques de colas. Estos yacimientos constituyen, hoy en día, pasivos ambientales mineros, que impactan negativamente en la calidad de las aguas, de los suelos y del aire de los ecosistemas que los contienen.

El material depositado en escombreras y diques de colas presenta concentraciones de metales que en el momento de la explotación no tenían valor económico. En particular, pirita y arsenopirita constituyen los sulfuros más abundantes en estos depósitos. Estos minerales, formados en la corteza terrestre en condiciones reductoras, al ser expuestos a las condiciones de superficie se desestabilizan y oxidan. Este proceso produce drenaje ácido, uno de los problemas ambientales más importantes que genera la actividad minera.

En la primera etapa (Reacción 1) se forma ácido sulfúrico y se liberan al ambiente metales pesados y otros elementos tóxicos, como arsénico (Dold, 2010). La reacción

1 describe la etapa inicial de la oxidación de pirita, cuando este mineral está expuesto a la meteorización en la superficie o en un dique de colas (Nordstrom, 1982). En la reacción 2 el ión ferroso se oxida a ión férrico y cuando este proceso ocurre a pH bajo, es catalizado por microorganismos que consumen la energía liberada en esta reacción. Los microorganismos más conspicuos que se desarrollan en estas condiciones extremas son *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* (Nordstrom y Southam, 1997; Dold, 2010). En la reacción 3, el ión férrico se combina con agua produciendo mayor acidez en el sistema, mientras que en la reacción 4, el ión férrico se convierte en oxidante de la pirita. En estas condiciones ácidas, la mayoría de los metales pesados están en solución y pueden contaminar aguas superficiales y subterráneas, fenómeno conocido como Drenaje Ácido de Minas (DAM).



En la década de 1990 un cambio sustancial en la legislación minera de Argentina impulsó el ingreso de empresas multinacionales que instalaron más de una docena de grandes proyectos mineros sobre la Cordillera de los Andes. Este cambio de escala en los procesos de explotación de minerales plantea serios riesgos de contaminación de las fuentes de agua en importantes regiones de Argentina.

## CONTEXTO GEOLÓGICO Y UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

La Puna es una altiplanicie elevada por encima de los 3700 m s.n.m. y ubicada en el extremo noroeste del territorio argentino. Se compone de un zócalo de rocas sedimentarias

y metamórficas de bajo grado de edad ordovícica que en el sector occidental están fuertemente deformadas. Estos depósitos contienen dos fajas de rocas predominantemente volcánicas de edad ordovícica media a superior. Depósitos mesozoicos a eoterciarios corresponden a una cuenca de rift. La característica más sobresaliente de la Puna es su volcanismo orogénico del Cenozoico (Figura 1), constituido por estratovolcanes y domos volcánicos de composición andesítica y dacítica, asociados a flujos ignimbólicos y coladas basálticas. Los yacimientos descritos en este trabajo están genéticamente vinculados a este volcanismo reciente. Finalmente, cuencas intermontanas endorreicas culminan en depósitos evaporíticos, constituyendo los grandes salares de la Puna (Ramos, 1999).

En este trabajo se presentan los avances en el conocimiento de tres pasivos mineros del noroeste argentino, denominados La Concordia, Planta de Tratamiento La Poma y Pan de Azúcar (Figura 1), que constituyen fuentes de aporte de metales pesados a las aguas y los suelos de la región. Los estudios en desarrollo pretenden profundizar la comprensión de los procesos biogeoquímicos involucrados, proponer bases para tareas de remediación y plantear cri-

terios de resguardo ambiental para explotaciones mineras actuales y futuras.

## Clima

Por sus características, el clima de la Puna en general se clasifica como continental andino del tipo semidesértico, con precipitaciones estivales e invierno frío y seco. Presenta ocho meses de estación seca (invierno) y cuatro meses donde se registra el total de las precipitaciones que varían entre 50 y 350 mm (verano). La temperatura media anual es de 8.7 °C. La temperatura mínima se registra en el mes de junio, con un valor medio de 2.1 °C, mientras que la máxima se registra en el mes de enero con 13 °C de valor medio. La amplitud térmica diaria es pronunciada. La región presenta un balance hídrico donde el exceso de agua es nulo a lo largo de todo el año; la evapotranspiración es máxima en los meses de verano, coincidiendo con el régimen estival de precipitaciones. La vegetación está escasamente desarrollada y el bajo contenido de materia orgánica y agua no permiten un amplio desarrollo de los suelos (Bianchi *et al.*, 2005).

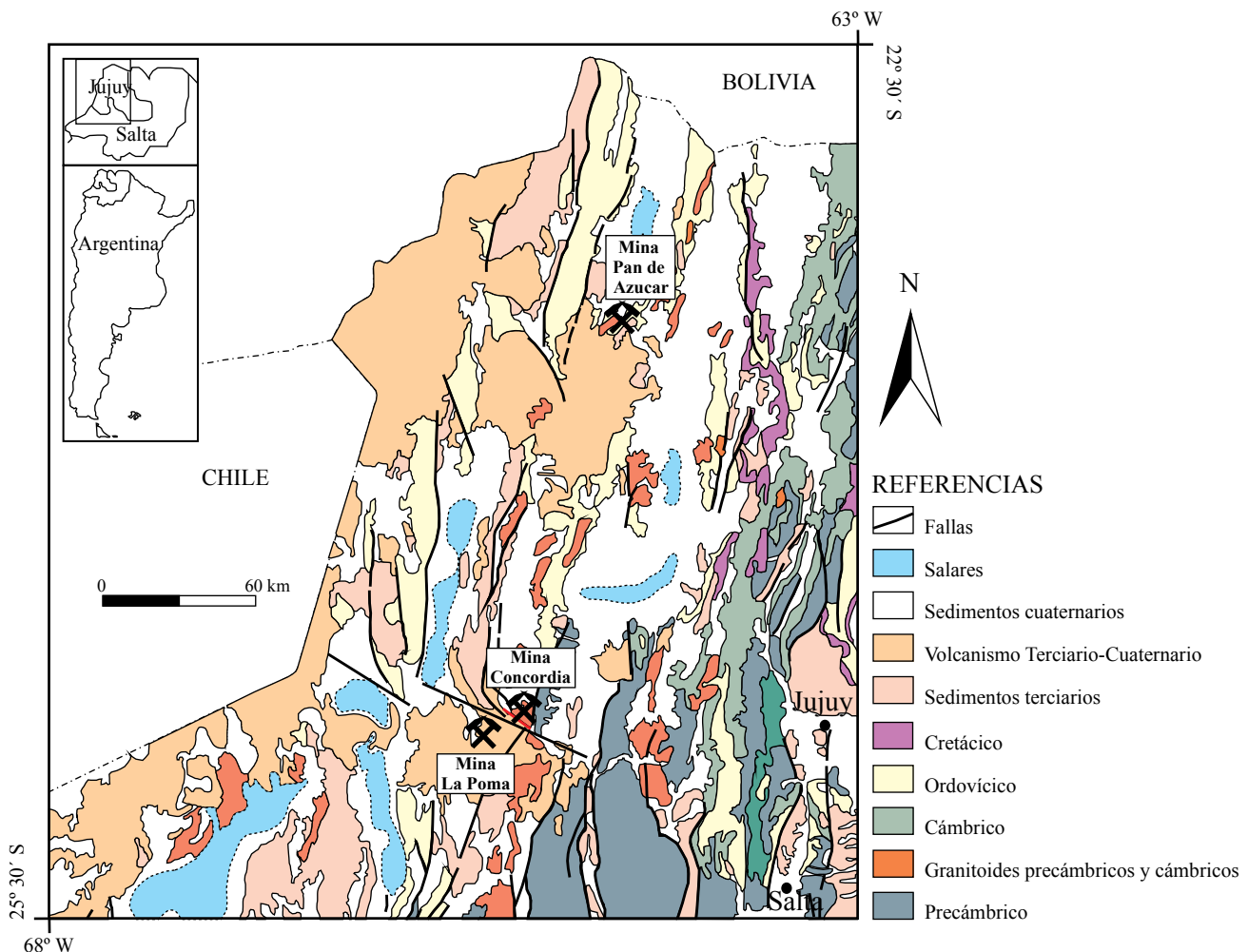


Figura 1. Mapa geológico del noroeste argentino con la ubicación de los tres pasivos mineros estudiados.

## METODOLOGÍA

En cada sitio de estudio se recolectaron muestras de aguas superficiales, sedimentos fluviales, sedimentos de los diques de colas y de las escombreras y, en algunos casos, también de suelos. Se recolectaron, además, minerales secundarios precipitados en la superficie de los diques de colas y en las márgenes de los arroyos.

Las muestras de agua para análisis de metales pesados fueron recolectadas en tubos plásticos de 15 mL y acidificadas a pH <2 con HNO<sub>3</sub> suprapuro, y fueron analizadas por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) en Act-Labs (Canadá); mientras que los sedimentos fueron analizados por digestión total y plasma de acoplamiento inductivo (TD-ICP) y análisis instrumental por activación de neutrones (INAA) en el mismo laboratorio. El pH y la conductividad eléctrica del agua fueron determinados *in situ*.

Los diques de colas fueron definidos estratigráficamente analizando variaciones granulométricas, de color y la presencia de sales eflorescentes. Las muestras fueron recolectadas con palas plásticas para evitar contaminación con metales; se extrajeron aproximadamente 2 kg de material por muestra, el cual fue almacenado en bolsas plásticas. En laboratorio, las muestras fueron secadas en bandejas plásticas a temperatura ambiente, en un cuarto cerrado y luego cuarteadas hasta obtener la cantidad requerida según cada análisis. Se realizaron análisis granulométricos para la determinación de la mineralogía primaria y secundaria bajo lupa binocular, sobre los retenidos de los tamices ASTM N° 10, 18, 25, 35, 45, 60, 80, 120, 170 y 230. Para la concentración de minerales pesados se realizó el cuarteo y luego se pesaron 100 g de cada muestra, los cuales fueron molidos 1-2 minutos en un molino de disco vibratorio modelo Retsch RS100, en cazoletas de aleación al tungsteno, y finalmente lavados en batea para concentrar la fracción pesada. Del lavado se obtuvieron dos fracciones: una compuesta por minerales livianos y otra por pesados; a su vez, de la fracción de pesados se separaron los minerales magnéticos mediante un imán. Una vez secas las distintas fracciones, se analizó la mineralogía presente en cada una de ellas bajo lupa binocular. Las muestras de los niveles más cohesivos se montaron en resina *epoxy* para confeccionar secciones delgadas para la identificación de los minerales transparentes por microscopía óptica. Se prepararon también probetas minerográficas para identificar los sulfuros por microscopía de reflexión.

La roca total fue analizada mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) usando un equipo Rigaku 2000 instalado en la Universidad Nacional de Salta. Los elementos mayoritarios/traza se analizaron con longitud de onda dispersa y un tubo de Rh, un detector SC y flujo de gas PC. Las muestras fueron pulverizadas en un molino de cazoleta de tungsteno tipo Herzog no contaminante, y secadas a 105 °C durante 24 h. Los elementos mayores fueron determinados en pastillas fundidas con tetraborato de litio

siguiendo procedimientos estandarizados publicados en la literatura, mientras que los elementos traza se determinaron usando pastillas prensadas (p. ej., Lozano and Bernal, 2005).

Las determinaciones de minerales secundarios y arcillas por la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) se realizaron en los laboratorios del Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy y del CIMAR de la Universidad Nacional del Comahue, con un difractómetro Rigaku DII max, ánodo CuK $\alpha$ ,  $\lambda=1,5414$  Å, filtro de Ni, 35 kv, 15 mA, velocidad de barrido 2°/min y goniómetro horizontal. Se separó bajo lupa binocular la fase cristalina a analizar. Se siguieron procedimientos de rutina de DRX recopilados de Moore y Reynolds (1989) y Collo *et al.* (2005). La concentración de la muestra pura se realizó separando manualmente bajo lupa binocular la fase cristalina a analizar.

Para los análisis de muestra total se procedió a cuartear la muestra, luego de pesar 3 g y moler en mortero de ágata hasta obtener un polvo pasante malla ASTM 200, de los cuales se tomaron 2 g para realizar el análisis. El polvo obtenido se montó en un portamuestra de aluminio de carga vertical. El equipo DRX se corrió desde los 3° a los 60° 2 $\theta$ , con una velocidad de 3 °/minuto.

Para las determinaciones de la fracción arcilla (<2 $\mu$ m) se procedió de la siguiente manera: (a) Molienda de la muestra a malla ASTM 70 y su posterior dilución en agua (3 g/L agua destilada) y llevado a 100 ml; (b) Extracción de una alícuota de la fracción <2 $\mu$ m según Carver (1971), a partir de la cual se prepararon tres vidrios portaobjetos con la dispersión para ser analizados; (c) Fracción <2 $\mu$ m orientada y secada al aire (AD) y, con el objeto de resaltar los parámetros basales de los argilominerales, se procedió a montar sobre vidrio portaobjeto una delgada película que se dejó secar a temperatura ambiente. Se corrieron los difractogramas desde los 2° 2 $\theta$  hasta los 40° 2 $\theta$ . d) Expandida en vapor de etilenglicol (EG): uno de los preparados orientados de la fracción <2 $\mu$ m se sometió a vapores de etilenglicol durante 24 h a 50° C en un desecador. Este tratamiento permite identificar la presencia de minerales arcillosos expansivos con la consecuente modificación del espaciado basal, en el caso de que estén presentes. Se corrieron los diagramas desde los 2° 2 $\theta$  hasta los 40° 2 $\theta$ . e) Calcinadas a 550° C: uno de los preparados orientados se calentó en una mufla durante 2 horas a temperatura constante de 550° C, lo que permite identificar el espaciado atómico (001) de la illita, al haber descartado la presencia de esmectita en los estados anteriores. Se corrieron los diagramas desde los 2° 2 $\theta$  hasta los 15° 2 $\theta$ .

El grado de oxidación de los sulfuros fue determinado mediante el análisis de las secciones delgadas de concentrados de granos de piritita (cubiertas con una película de grafito) empleando microscopía electrónica de barrido. Con este propósito se utilizó un equipo SEM/EDS instalado en el Laboratorio de Microscopía Electrónica LASEM-INIQUI de la Universidad Nacional de Salta. La metodología usada es similar a la reportada por Flores-Gutiérrez *et al.* (2010).

Se realizó en laboratorio un ensayo de caracterización físicoquímica de agua desionizada en contacto con materiales de los depósitos de colas de la mina La Concordia, a fin de simular en laboratorio los cambios que ocurren en el agua de lluvia al entrar en contacto con los sedimentos. El ensayo se realizó por duplicado: el primero, en un período de ocho días, tomando medidas de pH y conductividad dos veces por día; al ver que los datos se estabilizaron en el transcurso del primer día, se repitió el ensayo, esta vez realizando siete mediciones distribuidas en un período de 24 horas. Se seleccionaron tres muestras correspondientes al perfil del dique de colas N° 1 (Figura 2): DC1-A representando al nivel A (material arenoso color amarillento); DC1-C del último nivel de los depósitos residuales (material arcilloso color gris oscuro); DC1-D representando al sustrato o base fluvial sobre el que se asientan los residuos mineros (conglomerado fino de color pardo). Se tomaron 50 g de muestra (previamente secada, homogeneizada y cuarteada) que se colocaron en recipientes de vidrio, añadiendo 150 ml de agua desionizada en cada uno. Los recipientes fueron colocados en un agitador magnético a 120 rpm hasta la estabilización del pH y la conductividad eléctrica (Tonda, 2010). El método se basa en la suposición

de que la solución de poro interactúa con las partículas sólidas; la transición completa al lixiviado está indicada por la estabilización del pH (Romero *et al.*, 2007).

Una vez ocurrida la estabilización del pH, se dejó decantar y se recolectaron dos muestras de la solución, ambas previamente filtradas con filtros Millex de 45 µm de diámetro de poro; una fue acidificada con HNO<sub>3</sub> para su posterior análisis por ICP-MS en los laboratorios Act-Labs, Canadá. Los métodos analíticos de ICP-MS usados para la determinación de metales son similares a los reportados por Palacios-Fest *et al.* (2003), utilizando propiedades, patrones y tendencias de los elementos en la Tabla Periódica (Bernal y Railsback, 2008). La segunda muestra, sin acidificar, se preservó para su posterior análisis de pH y conductividad.

Finalmente, para los individuos vegetales muestreados en la mina Pan de Azúcar se determinaron parámetros fisiológicos (biomasa y longitud de parte aérea y radicular), se separaron raíz y parte aérea y cada una de las muestras fue digerida separadamente con una mezcla de ácidos concentrados. Las muestras obtenidas de la digestión química fueron analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de metales siguiendo procedimientos estandarizados y con límites de detección

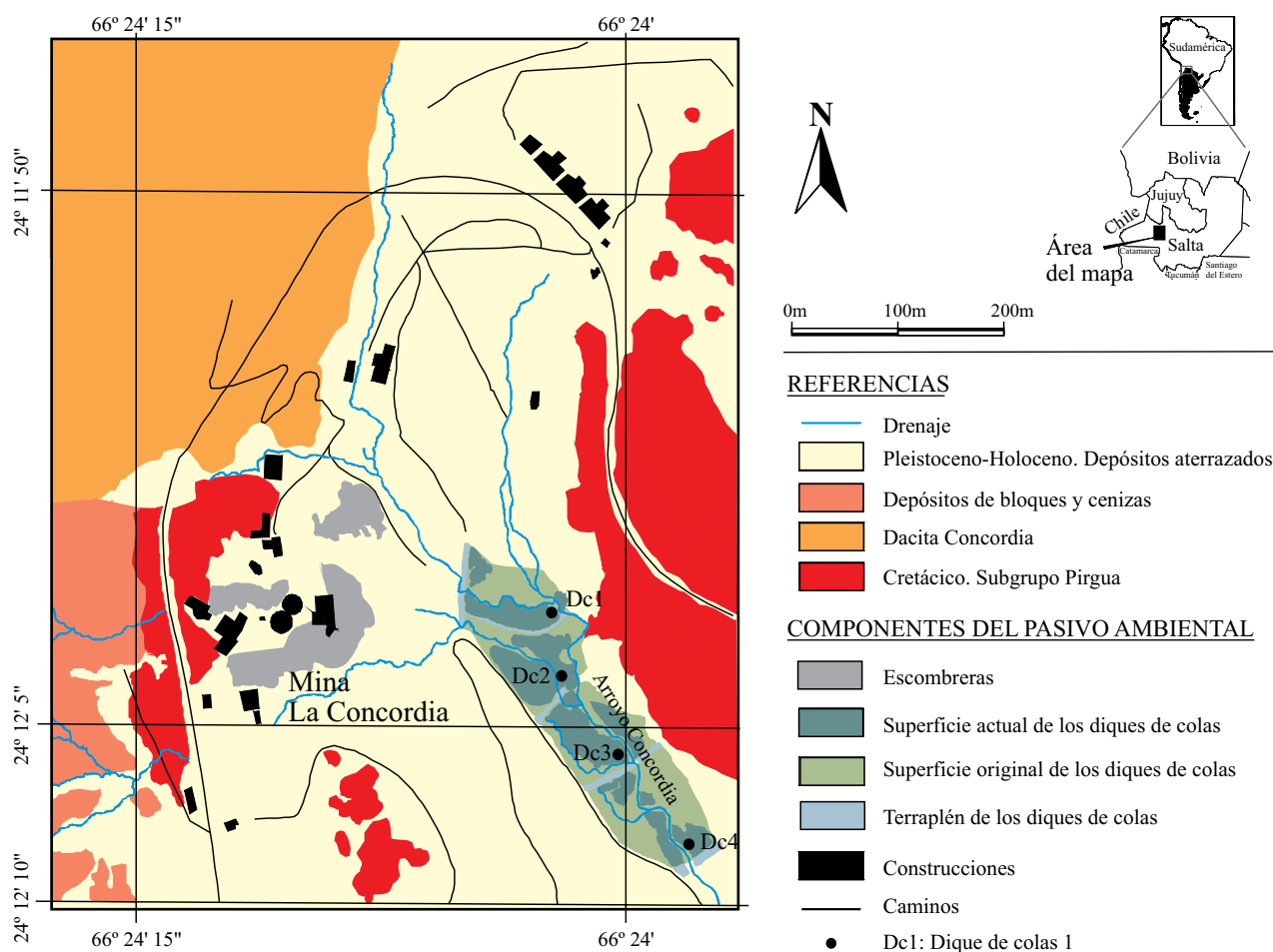


Figura 2. Mapa de mina La Concordia: geología, red de drenaje y componentes del pasivo ambiental.

similares a los reportados por técnicas de cromatografía iónica (Santoyo *et al.*, 2000).

## PASIVOS AMBIENTALES MINEROS DEL NOROESTE ARGENTINO

Este trabajo constituye la síntesis de estudios hidrogeoquímicos, sedimentológicos y mineralógicos realizados en tres pasivos ambientales mineros del noroeste argentino, con el objetivo de identificar el impacto ambiental producido, con el fin de generar las bases para futuras tareas de remediación.

### Pasivo ambiental minero La Concordia

#### *Ubicación y características geoquímicas generales del yacimiento minero*

Se localiza en el departamento Los Andes, a 185 km al ONO de la ciudad de Salta. Sus coordenadas geográficas son 24°12'27" S y 66°24'19" O y se encuentra a una altura media de 4200 m s.n.m. (Figura 1).

La mineralización es de tipo epitermal y está genéticamente vinculada a un domo dacítico de edad miocena. Se presenta en vetas verticales emplazadas principalmente en los conglomerados del Subgrupo Pírgua con una inclinación próxima a los 90°, una potencia promedio de 0.75 m, una longitud de 500 m y una extensión vertical reconocida de 200 m. Los minerales económicos eran blenda, galena y tetraedrita, acompañados de abundante pirita; el cuarzo constituía el principal mineral de ganga; arsenopirita, bournonita y calcopirita eran accesorios comunes (Argañaraz *et al.*, 1982; Sureda, 1992); estos minerales corresponden a la mineralogía primaria según la clasificación de Jambor (1994), también sugerida por Mendoza-Amezquita *et al.* (2006).

La explotación comenzó en el año 1900, destacándose la apertura de un pique principal de 140 m de profundidad y 1200 m de galerías. En 1914 se paralizó la actividad; en este período se construyó una planta de molienda primaria en el área de la mina y una planta de concentración por métodos gravimétricos a 10 km, en Nueva Pompeya. En el año 1976 se retomó la explotación y se construyó una planta de beneficio por flotación (Argañaraz *et al.*, 1982). El proceso utilizado comprendía trituración, molienda y finalmente concentración química mediante flotación, del cual se obtenía un concentrado final que se enviaba a un tanque para su sedimentación, recolección y secado en una plancha de hierro a fuego directo y una cola que se desechaba y depositaba en diques. En 1986 la mina contaba con siete niveles de galerías subterráneas que junto con varias labores auxiliares alcanzaron un desarrollo total superior a los 2000 m; en ese año se paralizaron definitivamente las actividades de explotación y producción, lo cual produjo la inundación de las labores al interrumpirse el bombeo del

agua subterránea (Argañaraz *et al.*, 1982). En la actualidad, las instalaciones construidas para llevar a cabo la operación minera en el último período de explotación se encuentran abandonadas, en algunos casos semiderruidas y la totalidad de los laboreos se encuentran inundados.

Los relaves producidos por la planta de concentración y parte del estéril se acumularon en cuatro diques de colas sucesivos (DC1, DC2, DC3 y DC4) ubicados en la quebrada del arroyo Concordia (Figuras 2 y 3a). Los diques consisten en murallones de material suelto extraído del entorno, sin impermeabilización en su base. La escombrera posee una superficie total 7800 m<sup>2</sup> y un volumen promedio 15,500 m<sup>3</sup>. La superficie original cubierta por los diques de colas fue de 20,370 m<sup>2</sup> con espesores medios de 3 a 5 m. Debido a que parte del relleno fue erosionado por el arroyo Concordia, actualmente estos depósitos cubren una superficie de 8500 m<sup>2</sup> (Figura 2), siendo el volumen calculado de 17,100 m<sup>3</sup>, tomando 2 m como espesor promedio. El material erosionado fue transportado aguas abajo dentro de la cuenca centripeta de las Salinas Grandes (Tonda, 2010).

El arroyo Concordia nace en un socavón de la mina, con pH 3–4 y valores elevados de algunos elementos críticos (As: 8.7 mg/L; B: 3.25 mg/L; Cd: 0.13 mg/L; Mn: 64.0 mg/L; Pb: 1.0 mg/L; Zn: 32 mg/L; Hg: 1.2 µg/L). Este arroyo se infiltra tras atravesar los diques de colas. La erosión fluvial ha destruido parcialmente los murallones de los diques. En época estival el caudal del arroyo es mayor y desemboca en el río San Antonio, que pasa por la localidad más poblada de la Puna argentina, San Antonio de los Cobres, ubicada 15 km aguas abajo de la mina.

### Resultados y discusión

*Diques de colas.* Se realizaron perfiles estratigráficos en los distintos diques de colas para su caracterización. Los mismos están compuestos por una sucesión de capas arenosas y arcillosas que se intercalan de manera irregular tal como fueron depositados durante la actividad de la mina (Figuras 3c y 4). En general se observa que la zona superior de estos depósitos se encuentra con mayor grado de oxidación, mientras que la inferior se halla más conservada. Es frecuente la presencia de una capa compacta y endurecida en la superficie de los diques de colas denominada duripan, con espesores que varían entre 5 y 10 cm y color pardo a pardo amarillento. Este material actúa como una cubierta que aísla los residuos de colas y los protege del avance rápido de la oxidación.

Se realizaron estudios de detalle en DC 1 (Figura 2). Se reconocieron cuatro niveles (Figura 4): El *Nivel A*, o *zona oxidada*, se desarrolla desde la superficie hasta los 68 cm de profundidad; está constituido por arena media a fina de color pardo amarillento. El *Nivel B*, o *zona de transición*, comprende desde los 68 cm hasta los 117 cm de profundidad, estando conformado por sedimentos arenosos de color gris verdoso. El *Nivel C*, o *zona no oxidada*, se desarrolla desde los 117 cm hasta los 155 cm de profundidad, y está constituido por arenas medias a finas de color gris y niveles



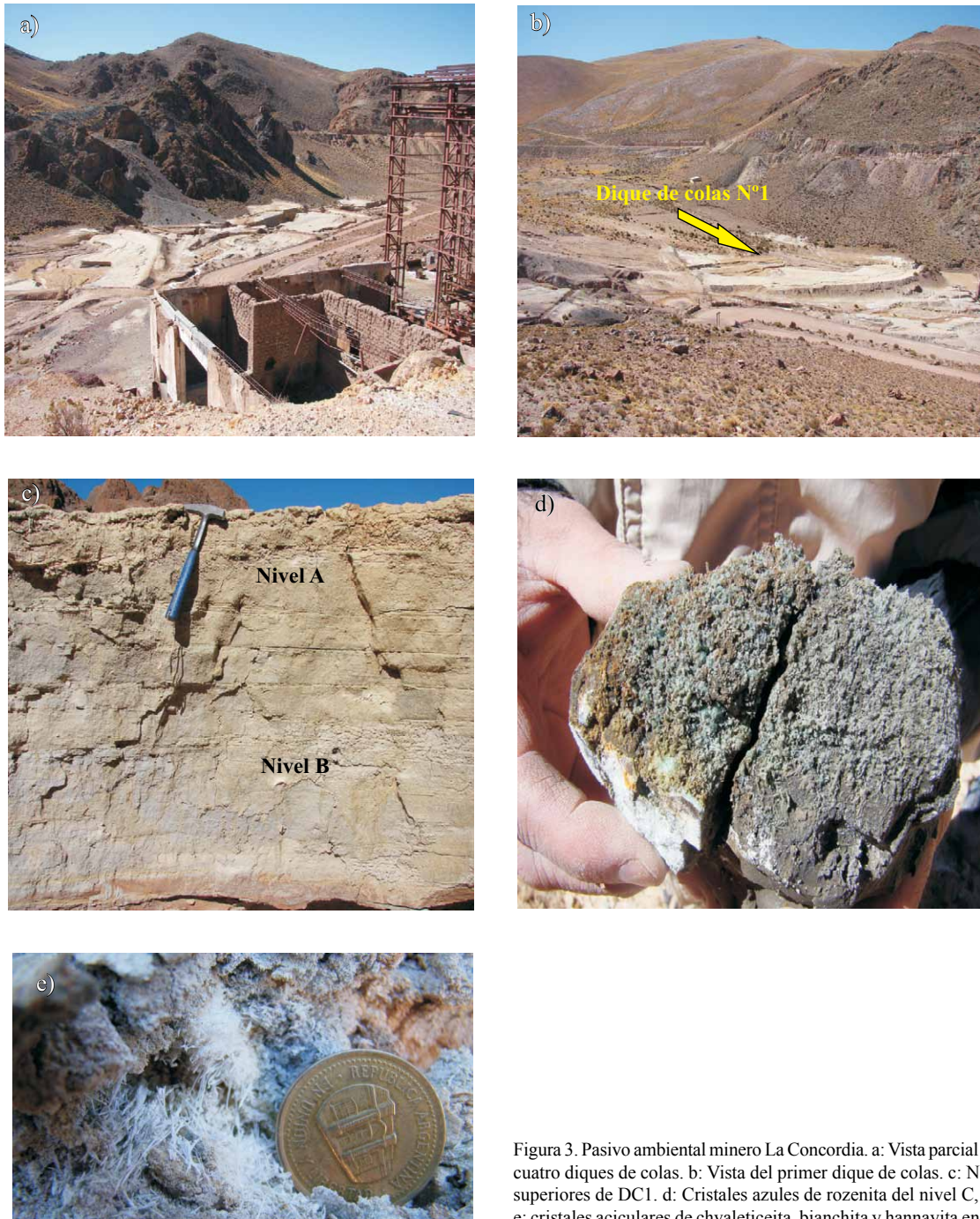


Figura 3. Pasivo ambiental minero La Concordia. a: Vista parcial de los cuatro diques de colas. b: Vista del primer dique de colas. c: Niveles superiores de DC1. d: Cristales azules de rozenita del nivel C, DC1. e: cristales aciculares de chvaleticeita, bianchita y hannayita en DC4.

arcillosos de color gris oscuro. Finalmente, el *Nivel D* es el sustrato del dique y está conformado por conglomerados finos con matriz arcillosa de color pardo. El contenido de humedad observado varía en el perfil, incrementándose con la profundidad; las capas inferiores poseen mayor humedad pero no están saturadas.

La observación bajo lupa binocular de las diferentes fracciones obtenidas mediante lavado con batea para muestras de los distintos niveles, permitió identificar en los concentrados la siguiente mineralogía: fragmentos líti-

cos, cuarzo, circón, hornblenda, rutilo, turmalina, baritina, biotita, hematites y sulfuros. No se observaron carbonatos y la abundancia de sulfuros en los concentrados varía entre 0.9 y 2.2 % (Tonda, 2010). El alto contenido de pirita en los diferentes niveles del perfil DC 1 permite inferir que las colas son potenciales generadoras de drenaje ácido.

Para muestras del Nivel A (oxidado) se determinó por microscopía de reflexión que el sulfuro predominante es pirita, con arsenopirita y galena subordinadas y mediante microscopía electrónica se reconoció que el grado de al-

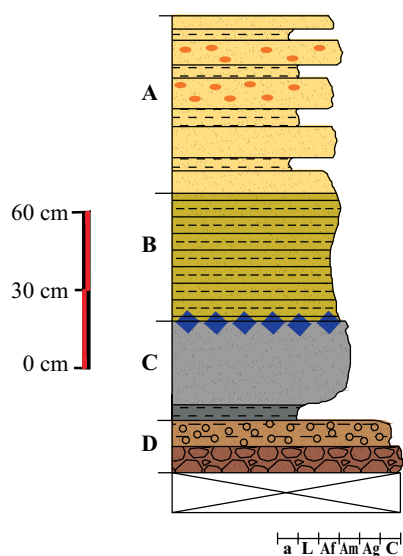
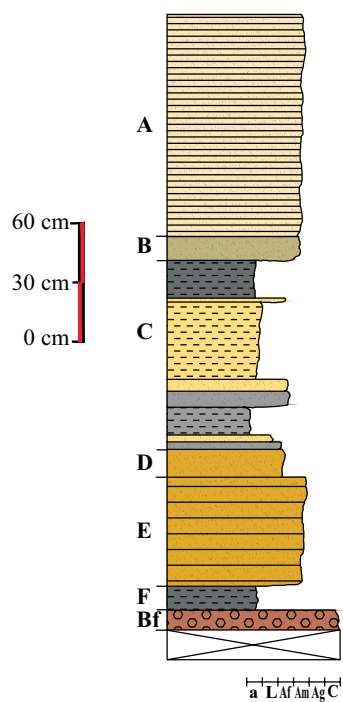
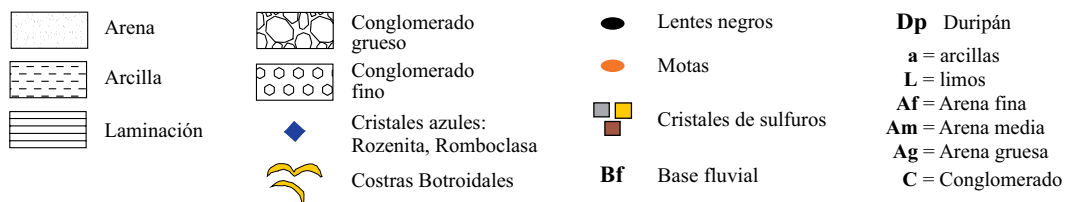
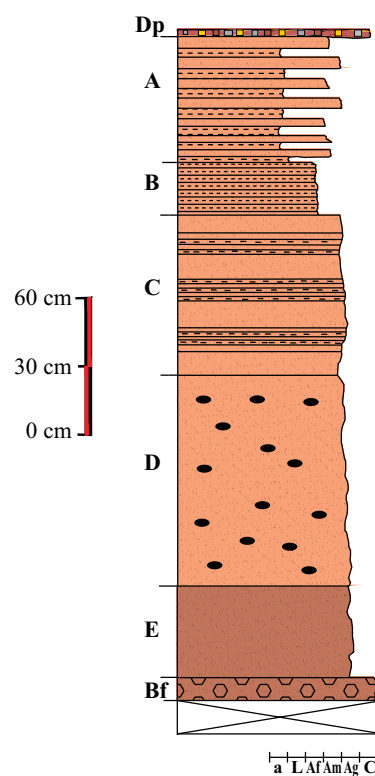
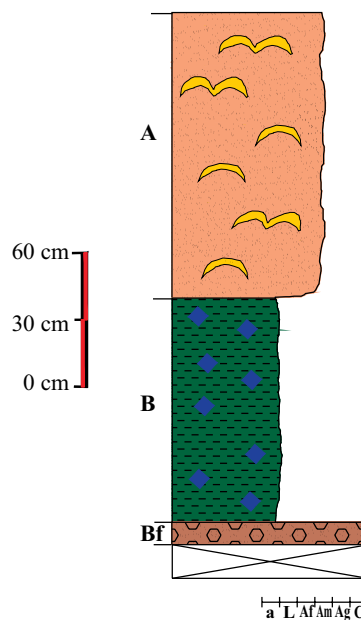
**DIQUE DE COLAS N° 1****DIQUE DE COLAS N° 3****REFERENCIAS****DIQUE DE COLAS N° 2****DIQUE DE COLAS N° 4**

Figura 4. Perfiles estratigráficos de los depósitos de colas de la mina La Concordia.



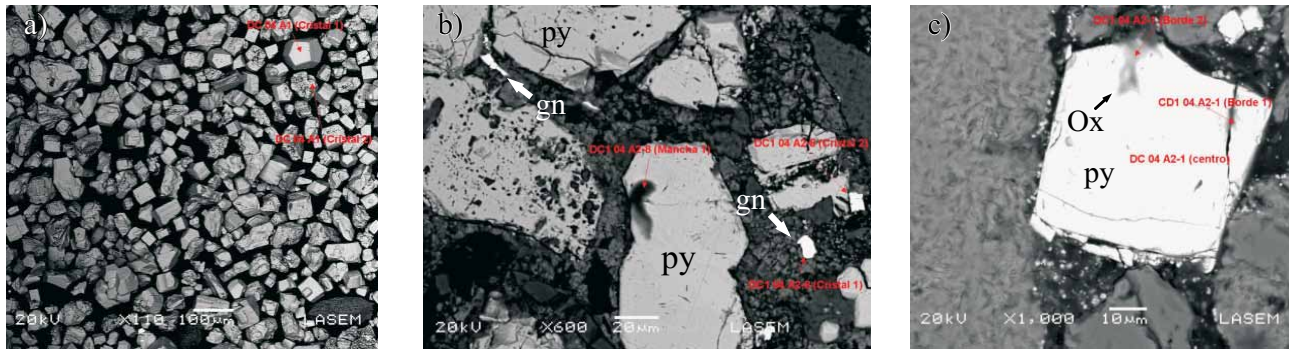


Figura 5. Fotomicrografías de microscopía electrónica de muestras del Nivel A del dique de colas 1 (DC1) de la mina La Concordia (letras en rojo pertenecen a la nomenclatura de las muestras analizadas por Tonda, 2010). a: Grano suelto de concentrado de sulfuros, donde predominan cristales euhédricos de pirita y subordinadamente arsenopirita. b: Sección delgada en la que se observan cristales de pirita parcialmente oxidados y galena subordinada. c: Cristal de pirita levemente oxidado.

teración de los sulfuros es bajo o nulo (Figura 5 a, b y c).

Los análisis químicos de los sedimentos correspondientes a los niveles A (oxidado) y C (inalterado) de DC 1 se muestran en la Tabla 1. Al compararse el nivel A con el C se observa que el primero se encuentra empobrecido en elementos como Ag, Cd, Cr, Cu, Pb, Rb, Sb, V, W, y elementos de las Tierras Raras, y en los óxidos mayoritarios  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , principalmente. Elementos como Fe, As, Ni, S, Zr y Au se encuentran en mayor proporción.

El nivel C representa la composición original de las colas depositadas en el dique en el sector muestreado. La diferencia en concentración de los distintos elementos mencionados muestra ganancias y pérdidas tras el proceso de oxidación. Se destaca para el nivel A (oxidado) un marcado enriquecimiento en As lo que sugiere la precipitación de arseniatos de Fe (Kartinen y Martin, 1995). En cuanto a los óxidos mayoritarios, el enriquecimiento en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total puede interpretarse, principalmente, en relación con sílice y alúmina que disminuyen significativamente lo que genera un enriquecimiento relativo. En el nivel C, el Fe se encuentra en la estructura de los sulfuros como  $\text{Fe}^{2+}$ , mientras que en el nivel A también está presente como  $\text{Fe}^{3+}$  en óxidos e hidróxidos. A su vez, la evapotranspiración potencial, en un clima semidesértico con fuerte déficit hídrico, puede constituir un agente de ascenso vertical de iones disueltos en agua.

En el ensayo de laboratorio de caracterización físico-química de agua en contacto con los depósitos de colas se observó una brusca disminución del pH a valores de 2 a 3 durante los primeros minutos del experimento, estabilizándose en esos valores durante la primera hora. Por otro lado, la conductividad se incrementó rápidamente al comienzo del experimento y se estabilizó con el tiempo. Este ensayo se realizó para tres muestras de sedimentos del dique de colas 1, que comprenden muestras del nivel oxidado, del nivel reducido y del sustrato del dique (Tonda, 2010). De estas muestras se seleccionó DC1-A, correspondiente al nivel oxidado, por ser la que muestra el comportamiento más representativo de proceso analizado (Figura 6, Tabla 2).

De acuerdo con los análisis químicos, en las muestras de agua de la solución experimental se observan altos contenidos en metales pesados como Pb, Ag, Zn y Cu provenientes de la explotación minera (Tabla 3). Además se encuentran en solución todos los elementos químicos analizados, desde los metales alcalinos y alcalino-térreos, hasta los metales pesados y tierras raras; en ciertos casos la concentración es superior al punto máximo de calibración lineal del equipo de ICP-MS. En el caso particular de los elementos de tierras raras, su registro como iones disueltos

Tabla 1. Análisis químicos de los sedimentos de los niveles A y C del dique de colas 1 (DC1) de la mina La Concordia. LD: Límite de detección.

Unidades	Método	LD	DC1-A	DC1-C
$\text{SiO}_2$ (%)	FUS-ICP	0.01	55.06	62.54
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	FUS-ICP	0.01	6.9	13.89
$\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$ (%)	FUS-ICP	0.01	12.72	4.17
Au (ppb)	INAA	5	495	94
Ag (ppm)	M-INAA / TD-ICP	0.5	89.8	107
As (ppm)	INAA	2	2790	1730
Cd (ppm)	TD-ICP	0.5	37.6	44.8
Cr (ppm)	INAA	1	< 1	66
Cu (ppm)	TD-ICP	1	1570	1700
Ni (ppm)	TD-ICP	1	50	24
Pb (ppm)	TD-ICP	5	4340	> 5000
S (%)	TD-ICP	0.001	10.7	3.15
Sb (ppm)	INAA	0.2	952	1820
V (ppm)	FUS-ICP	5	43	79
W (ppm)	INAA	3	12	57
Zn (ppm)	TD-ICP	1	2660	2610
La (ppm)	INAA	0.2	23.9	35.3
Ce (ppm)	INAA	3	51	81
Nd (ppm)	INAA	5	23	42
Sm (ppm)	INAA	0.1	7	8.2
Eu (ppm)	INAA	0.1	1.7	1.8
Tb (ppm)	INAA	0.5	< 0.5	< 0.5
Yb (ppm)	INAA	0.1	3.4	2.3
Lu (ppm)	INAA	0.05	0.42	0.51

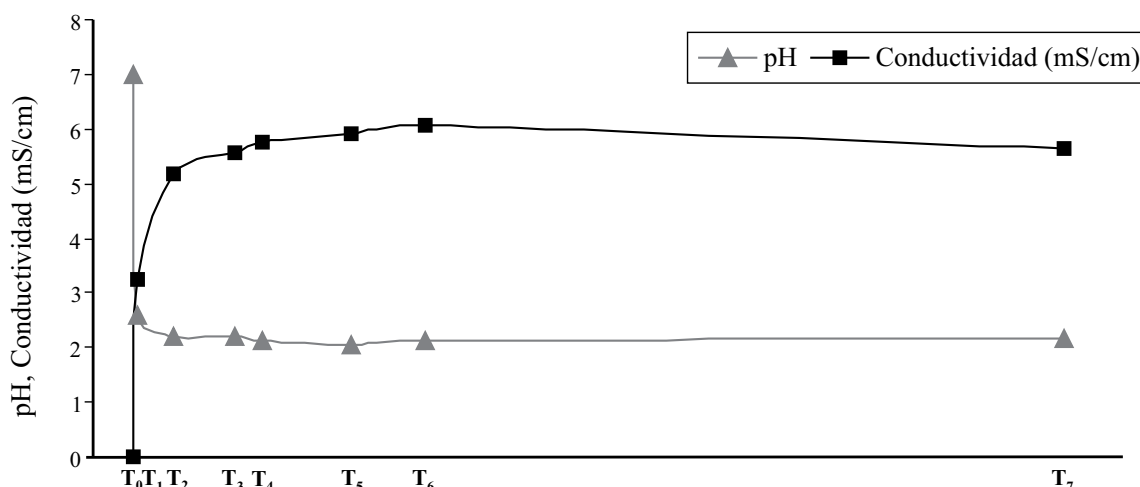


Figura 6. Variación de pH y conductividad eléctrica en el tiempo, en lixiviados en contacto con los depósitos del primer dique de colas. Ensayo realizado en un período de 24 horas. Nótese la rápida estabilización del pH. Muestra DC1-04A<sub>1</sub> correspondiente al nivel A del dique de colas 1, mina La Concordia.

en el agua del experimento (Tabla 3) concuerda con su empobrecimiento en el nivel oxidado A respecto al nivel C, indicando la capacidad de disolución que posee el agua a pH bajo (Tonda *et al.*, 2011).

Esto permite interpretar que en la estación húmeda, el agua de lluvia que escurre, a pesar de tener poco tiempo de contacto con los sedimentos de los diques de colas, disminuye rápidamente su pH e incrementa su contenido en metales disueltos. Lo mismo ocurre con el agua de lluvia que se infiltra en los sedimentos de los diques de colas; en esta circunstancia el tiempo de contacto será mayor y probablemente también su contenido en elementos disueltos.

**Minerales secundarios en los diques de colas.** Las condiciones climáticas de intensa aridez y elevada evaporación favorecen la precipitación de minerales secundarios en forma de óxidos y eflorescencias, a partir de las soluciones que atraviesan los materiales de los diques de colas. Anualmente las eflorescencias precipitan durante la estación seca y se solubilizan en el período húmedo. En las paredes verticales de los diques de colas disectados por el arroyo Concordia, y también en los bordes del mismo, se

identificaron sales eflorescentes y minerales secundarios, como rozenita, jarosita, szomolnokita, anglesita, norstrandita, ferricopiapita entre otros (Figura 7). Estos minerales son precipitados comunes de desechos mineros ricos en sulfuros con un grado avanzado de oxidación (Nordstrom, 1982; Jambor, 1994; Nordstrom y Alpers, 1999).

Para el caso de norstrandita y szomolnokita presentes en el nivel A del DC1, se detectó por FRX que poseen Pb, Zn, Cu y As (Tabla 4). Estos elementos están presentes en la solución de agua de poro del ensayo realizado a la muestra de sedimentos de este nivel (Tabla 3). En la composición de los minerales secundarios se identifican algunos de los elementos que se encuentran en la solución de poro y que se movilizan en el sistema; esto indica que los minerales secundarios son capaces de capturar y precipitar metales pesados.

De acuerdo a Nordstrom (1982) y Nordstrom y Alpers (1999), cuando las sales eflorescentes se disuelven, no sólo liberan los metales, sino que también disminuyen el pH del agua debido al proceso de oxidación e hidrólisis de hierro. Esto podría ocurrir durante el período húmedo con la disolución de las sales eflorescentes determinadas en este trabajo.

La presencia de jarosita en distintos niveles de DC1 indica la oxidación de Fe<sup>II</sup> a Fe<sup>III</sup>, aumentando significativamente la acidez (pH 1.5 – 3) en el fluido de poro y la oxidación de sulfuros primarios. Estos minerales son indicadores de grados avanzados en los procesos de oxidación y generación de drenaje ácido de minas (Dold y Fontboté, 2001).

### Planta de concentración La Poma

#### Ubicación y características geoquímicas generales del yacimiento minero

La planta de tratamiento La Poma es un pasivo minero

Tabla 2. Ensayo de caracterización fisicoquímica de agua desionizada en contacto con los depósitos de colas de DC1, mina La Concordia.

Tiempo	(hs)	pH	Conductividad (mS/cm)
T <sub>0</sub>	0	7.00	0.00005
T <sub>1</sub>	00:10	2.60	3.25
T <sub>2</sub>	01:00	2.19	5.16
T <sub>3</sub>	02:30	2.19	5.58
T <sub>4</sub>	03:20	2.12	5.76
T <sub>5</sub>	05:40	2.05	5.93
T <sub>6</sub>	07:20	2.12	6.07
T <sub>7</sub>	23:00	2.18	5.63

T<sub>0</sub>: Tiempo cero.

Tabla 3. Composición química de la solución experimental del ensayo de poro realizado con la muestra del sedimento del dique de colas 1 (DC1), mina La Concordia.

Elemento	Límite de detección (µg/L)	Concentración (µg/L)	Elemento (µg/L)	Límite de detección (µg/L)	Concentración (µg/L)
Li	1	286	Sn	0.1	8.6
Be	0.1	164	Sb	0.01	> 200
Na	5	2980	Te	0.1	65.8
Mg	1	> 40000	I	1	< 2
Al	2	> 4000	Cs	0.001	> 400
Si	200	1000	Ba	0.1	7.8
K	30	27700	La	0.001	48.2
Ca	700	> 40000	Ce	0.001	180
Sc	1	53	Pr	0.001	37.6
Ti	0.1	254	Nd	0.001	241
V	0.1	> 100	Sm	0.001	> 20.0
Cr	0.5	577	Eu	0.001	49.6
Mn	0.1	> 20000	Gd	0.001	> 200
Fe	10	> 20000	Tb	0.001	49.4
Co	0.005	> 400	Dy	0.001	279
Ni	0.3	> 2000	Ho	0.001	49.5
Cu	0.2	> 400	Er	0.001	124
Zn	0.5	> 500	Tm	0.001	14.9
Ga	0.01	135	Yb	0.001	87.9
Ge	0.01	1.54	Lu	0.001	11.4
As	0.03	> 400	Hf	0.001	3.4
Se	0.2	19	Ta	0.001	0.318
Br	3	37	W	0.02	4.62
Rb	0.005	874	Re	0.001	0.007
Sr	0.04	320	Os	0.002	< 0.004
Y	0.003	> 400	Pt	0.3	< 0.6
Zr	0.01	19	Au	0.002	0.004
Nb	0.005	0.38	Hg	0.2	< 0.4
Mo	0.1	< 0.2	Tl	0.001	> 40.0
Ru	0.01	0.32	Pb	0.01	> 400
Pd	0.01	0.76	Bi	0.3	291
Ag	0.2	191	Th	0.001	133
Cd	0.01	> 2000	U	0.001	160
In	0.001	354			

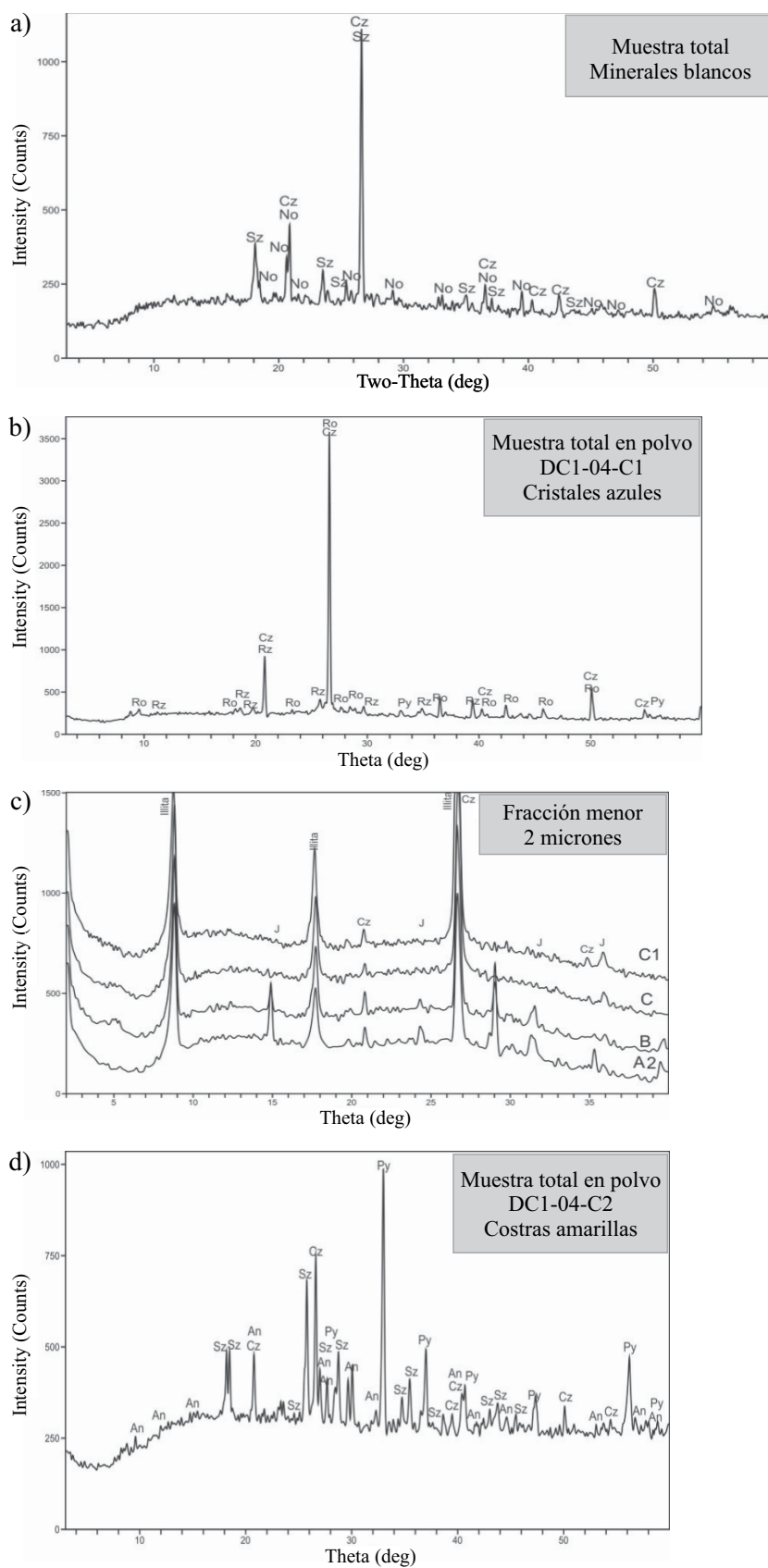
> 20.0 concentración superior a 20.0 µg/L.

ubicado a 180 km al ONO de la ciudad de Salta y a 20 km al SO de la mina La Concordia (Figura 1). La planta procesaba material cuya mena consistía en galena argentífera. Los minerales accesorios eran pirita, calcopirita, blenda (esfalerita), cerusita y óxido de cobre. Los minerales que componían la ganga eran cuarzo, calcita y trozos de la roca de caja (dacitas) provenientes de depósitos polimetálicos complejos de Pb-Ag-Zn emplazados en volcanitas cenozoicas (Argañaraz y Sureda, 1979).

La actividad de la planta comenzó en el año 1955. El mineral se trataba manualmente por métodos gravimétricos, sin sustancias químicas. El proceso de concentración de mena continuó siendo puramente gravimétrico hasta el año 1973, cuando se introdujo como etapa final de tratamiento el método de flotación con el objeto de lograr un mayor porcentaje de recuperación de mineral. La planta funcionó

de esta forma hasta su cierre alrededor del año 1985, dejando instalaciones y un importante volumen de residuos del proceso de concentración expuestos a la meteorización y sin medidas de protección para evitar contaminación, principalmente del río Tajamar, cuyas aguas atraviesan los residuos. Este río constituye una fuente de agua permanente en esta zona caracterizada por la aridez.

En la actualidad, la planta de tratamiento está totalmente abandonada y en el área se reconocen diferentes tipos de desechos mineros que se diferencian del paisaje natural circundante por su color gris verdoso y la ausencia de vegetación. Por un lado se distribuyen acumulaciones de material estéril en el margen derecho del río Tajamar; estos materiales conforman montículos irregulares de granulometría diversa y disposición caótica que actualmente son en parte afectados por erosión fluvial. Por otro lado, se



encuentra la escombrera que no posee impermeabilización en su base; sus materiales están en permanente contacto con el agua del río y en sus márgenes precipitan sales de color ocre y blanco. Por último, en el margen izquierdo del río se encuentran los residuos del proceso de flotación (colas) que fueron depositados sobre afloramientos basálticos que forman depresiones naturales; su volumen es difícil de cuantificar debido a las irregularidades topográficas que presenta la zona; aunque en la orilla del río estos residuos muestran aproximadamente 1.5–2 m de espesor (Figura 8).

### Resultados y discusión

En general, los análisis químicos de los diferentes tipos de desechos mineros presentan elevados valores de As, Pb, Cu, Cd, Zn y Sb (Tabla 5). Para determinar la influencia del pasivo minero sobre el río Tajamar se tomaron cinco muestras de agua en distintas posiciones durante la estación seca (invierno) (Figura 8). Los resultados indicaron que en las muestras 2 y 3 se registra un descenso en el valor de pH y un incremento notable en la concentración de metales pesados y As. Estas muestras son las que reciben el aporte directo del agua que escurre de la escombrera y del estéril, principalmente de manera subterránea (Tabla 6 y Figura 9). Aguas abajo las concentraciones disminuyen abruptamente y el pH recupera los valores normales (muestras 4 y 5).

La rápida disminución en la concentración de metales del río Tajamar en las muestras 4 y 5 está vinculada a diversos factores: mayor dilución en las muestras, ya que se encuentran alejadas de la fuente directa de aporte; precipitación de metales junto a las sales eflorescentes observadas en las dos márgenes del río; y adsorción por los sedimentos finos del río que posee 3 a 5 % de componentes limo-arcillosos.

Si bien se constata un proceso de remediación natural en el río Tajamar, se debe tener en cuenta que estos datos corresponden a la estación seca; en la época estival es de esperar que el aporte de metales al río sea mayor debido al escurrimiento superficial y a la disolución de sales eflorescentes (Cacciabue *et al.*, 2011).

### Pasivo Pan de Azúcar

#### Ubicación y características geoquímicas generales del yacimiento minero

La mina Pan de Azúcar se ubica en la puna de la provincia de Jujuy a una altura de 3700 m s.n.m. Sus coordenadas geográficas son 22°32' S, 66°01' W – 22°38' S, 66°08' W (Figura 1). Es un yacimiento vetiforme de Pb, Zn, Ag y Sb, cuya mena se localiza en una veta cuarzosa de rumbo N 110°, inclinada en forma subvertical al sur. Posee una longitud de más de 600 m y una profundidad de más de 250 m. Los minerales de mena son esfalerita y galena con minerales de Ag como inclusiones. Pirita y marcasita son abundantes. Están presentes en escasa proporción arsenopirita, bournonita, calcopirita y otros. El cuarzo es el

Tabla 4. Concentración de metales pesados determinada por FRX en sales eflorescentes de los diques de colas de la mina La Concordia.

	Pb (%)	Zn(%)	Cu(%)	As (%)
nordstrandita y szmolnokita	1.030	0.292	0.217	0.347
dietrichtita y mopungita	0	1.925	1.876	0.021
rozenita y romboclasa	2.130	0.220	0.250	0.300

principal mineral de ganga y la calcita es escasa. El yacimiento se encuentra emplazado en dacitas y parcialmente en brechas dacíticas alteradas hidrotermalmente por procesos de caolinización, sericitización, silicificación y piritización (Segal y Caffé, 1999).

Las actividades más remotas en la mina datan de la época colonial. La explotación se realizó de manera subterránea a través de piques y galerías, hasta el nivel -210 m. En el año 1975 la explotación diaria oscilaba alrededor de 33 t con 7.3 % de Pb, 5.6 % de Zn y 461 g/t de Ag. En el año 1990 se produjo la suspensión de las actividades de explotación ya que la mina contaba con escasas reservas (Segal y Caffé, 1999).

El pasivo minero Pan de Azúcar está integrado por construcciones edilicias en estado de abandono y deterioro y por los depósitos de los materiales generados durante la explotación de la mina. Así se destaca una escombrera en los alrededores de la planta de trituración y diques de colas depositados al norte y al sur de la boca de mina.

La escombrera está constituida por fragmentos de roca de tamaño variable y con abundante pirita en su composición mineralógica. Tanto en el período de lluvias como en el período seco, se observa desde la base de la escombrera el escurrimiento de agua de color rojizo con pH 1.

El material residual del proceso de flotación se encuentra por un lado disperso por espacio de 4 km hacia el norte y sur de la mina, ocupando un área de 1 km<sup>2</sup> en total con un espesor que no supera el metro; estas colas se incorporan a los suelos aledaños donde crece vegetación, alimento de los animales de cría de la región. En los perfiles de suelo ubicados en el área de influencia de estos residuos se detectaron valores anómalos de Pb y Zn.

Tabla 5. Concentración de metales en los sedimentos de los residuos mineros del pasivo Planta de concentración La Poma.

(ppm)	Lím. Det.	Método	Colas1*	Colas2*	Escombrera
Cu	1	TD-ICP	280	905	878
Zn	1	TD-ICP	1330	2170	865
Cd	0.5	TD-ICP	2.5	5.7	< 0.5
Pb	5	TD-ICP	> 5000	> 5000	> 5000
As	2	INAA	2320	3150	2430
Sb	0.2	INAA	185	201	162

< 0.5 concentración menor a 0.5 ppm; \*colas ubicadas en el margen izquierdo del Río Tajamar.



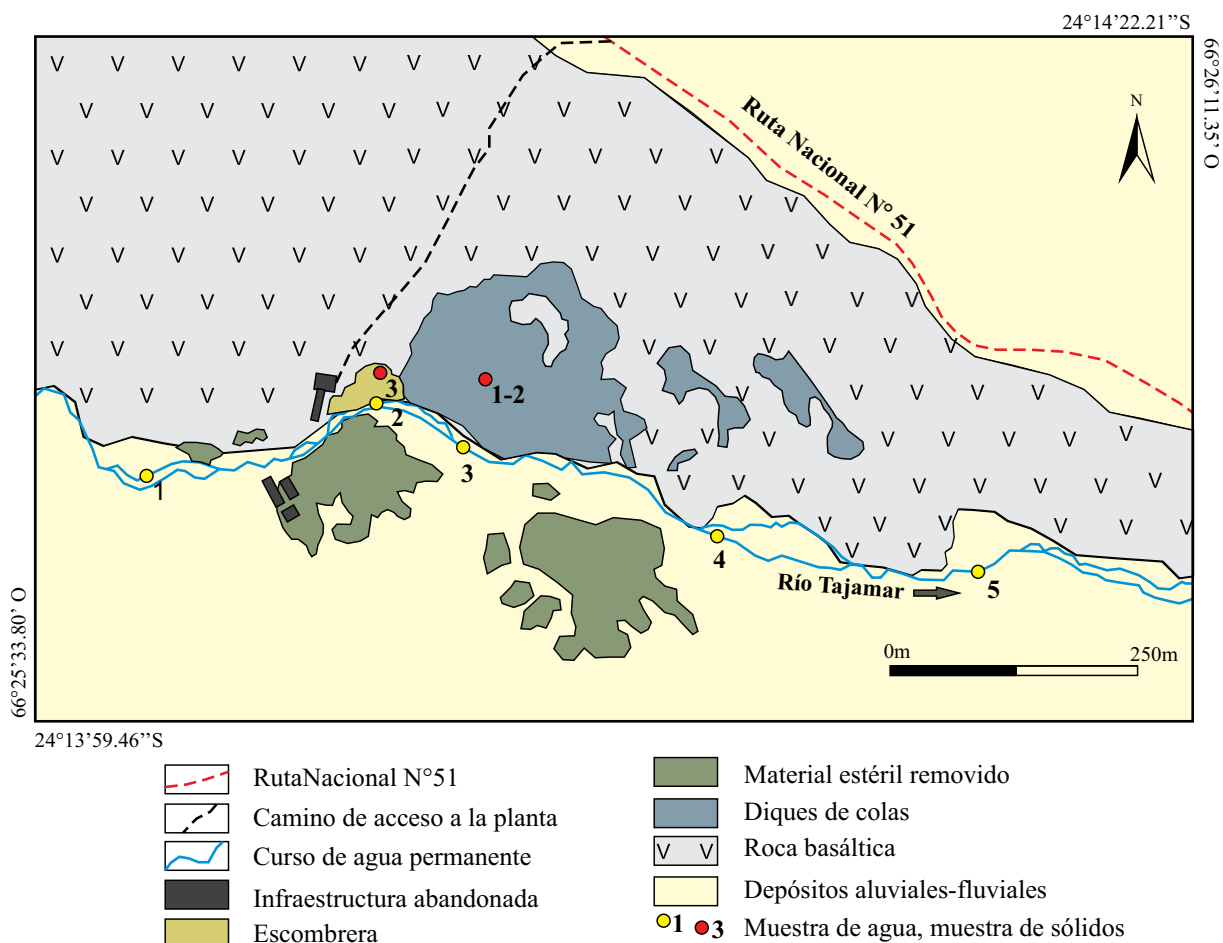


Figura 8. Mapa del pasivo minero planta de tratamiento La Poma: geología, red de drenaje y componentes del pasivo ambiental.

Próximos a la boca de mina existen tres diques de colas con espesores de aproximadamente dos metros de materiales provenientes de la planta de beneficio que fueron construidos con posterioridad; se trata de intercalaciones de arcillas y arenas finas depositadas sobre un sustrato conglomerático de color rojizo. Al igual que en la mina La Concordia, los primeros centímetros de estos depósitos están conformados por un duripan de color pardo amarillento. Por debajo, el material se encuentra húmedo, y se distinguen una zona superior con oxidación incipiente y una inferior inalterada donde predomina el color gris oscuro. A simple vista se observa la presencia de pequeños cristales de sulfuros (Figura 10).

### Resultados y discusión

Para identificar los metales presentes en los diques de cola, escombreras y suelos aledaños, se extrajeron muestras representativas. Los análisis muestran la abundancia en Zn, Pb, Ag, Cu y As (Tabla 7).

El dique de colas próximo a la planta no está erosionado, pero los otros han sido disectados por el escurrimiento superficial en la época de lluvias y sus paredes se encuentran desmoronadas. Durante el periodo estival los

materiales de los diques son retransportados aguas abajo en dirección norte; luego este material fluye hacia los arroyos que atraviesan el sector. En la base de los diques se observa agua que drena de los mismos con  $\text{pH} < 2$ , tanto en estación húmeda como seca. En los bordes de estos pequeños canales de agua se observa la precipitación de sales eflorescentes (Figuras 11a y 11b). Se realizó un relevamiento en el área circundante a la mina para detectar la presencia de metales en especies vegetales. En la Tabla 8 se muestran los valores de plomo y zinc absorbidos por la vegetación muestreada (Plaza-Cazón *et al.*, 2011).

Tabla 6. Contenido en metales y pH en muestras de agua del río Tajamar.

	Lím. Det.	Método	1	2	Muestra 3	4	5
Cu ( $\mu\text{g/L}$ )	0.2	ICP-MS	0.6	175	72.3	1.3	1.2
Zn ( $\mu\text{g/L}$ )	0.5	ICP-MS	1.8	285	179	9.1	2.8
Cd ( $\mu\text{g/L}$ )	0.01	ICP-MS	0.03	4.02	1.72	0.04	< 0.02
Pb ( $\mu\text{g/L}$ )	0.01	ICP-MS	0.43	3.25	6.09	0.35	0.61
pH			7	6.5	6	6.5	6.5

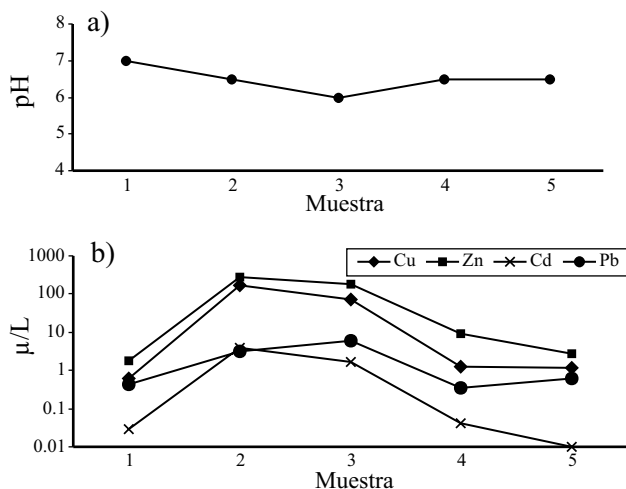


Figura 9. Variación del pH y de la concentración de metales en el río Tajamar, a la altura del pasivo minero La Poma.

Al sureste de la mina se encuentra el lecho del Río Cíncel, uno de los ríos más importantes del sector y el principal afluente de la Laguna de Pozuelos que, ubicada 25 km al norte del pasivo minero, fue declarada Reserva de la Biósfera por la UNESCO en el año 1990. Los arroyos del norte de la mina, que reciben el aporte del drenaje ácido y las colas ubicadas al sur de la misma luego desembocan en el río Cíncel.

La cuenca de Pozuelos es un ecosistema complejo en el que habitan comunidades originarias dedicadas fundamentalmente a la cría de ovejas, cabras y llamas. El agua para consumo humano es subterránea y se obtiene de un acuífero libre a una profundidad menor a 2 m.

El pasivo minero Pan de Azúcar es una fuente generadora de drenaje ácido desde al menos los últimos 20 años, sin acciones de manejo y control ambiental que permitan prevenir estos procesos.

## CONCLUSIONES

Los estudios realizados hasta el momento en los pasivos ambientales mineros de Pb-Ag-Zn del noroeste argentino permiten identificar un impacto ambiental negativo, debido a la presencia de metales en el agua superficial, sedimentos fluviales y vegetación circundante a estos sitios. Estos metales provienen de los procesos de oxidación de sulfuros presentes en los diques de colas y escombreras y la consecuente generación de drenaje ácido de mina.

El ensayo de disolución de sedimentos de diques de colas de mina La Concordia mostró un brusco descenso del pH y la solubilización inmediata de todos los elementos químicos, llegando a disolver los elementos de las Tierras Raras, de muy baja solubilidad. Se infiere que este proceso es el que ocurre durante el período estival cuando el agua de lluvia entra en contacto con los residuos mineros.



Figura 10. Perfil del dique de colas 2 (DC2) de mina Pan de Azúcar. a: Duripan; b: nivel oxidado; c: nivel inalterado con cristales de sulfuros; d: sustrato conglomerático.

Las efflorescencias salinas retienen los metales pesados encontrados en las soluciones porales de los diques de colas, actuando como receptores temporales. Estos minerales solubles se disuelven en cada ciclo anual de precipitaciones dejando a los metales pesados nuevamente disponibles, e incrementando la acidez en la red de drenaje.

La ausencia de carbonatos en los diques de colas y en los sedimentos de las cuencas estudiadas reduce la capacidad neutralizadora de estos sistemas y los convierte en más vulnerables a los efectos negativos del drenaje ácido de mina (DAM).

El aporte de metales está relacionado a los procesos

Tabla 7. Concentración en ppm de metales en las colas y suelos del pasivo minero Pan de Azúcar.

(ppm)	Cu	Ag	As	Pb	Zn
Escombrera	47.9	6.7	57.2	100.1	475.3
Colas-Sur	130.1	26.6	0.4	2318.2	2320.2
Colas-Norte	48.2	42.3	1.1	319.1	343.7
DC1	1098.7	60.9	33.2	1215.9	1595.7
DC2	224.3	172.7	0.7	1488.3	1544.6
DC3	163.5	15.5	90.6	150.4	364.4
Suelo	92.9	12.9	0.5	417.8	107.4

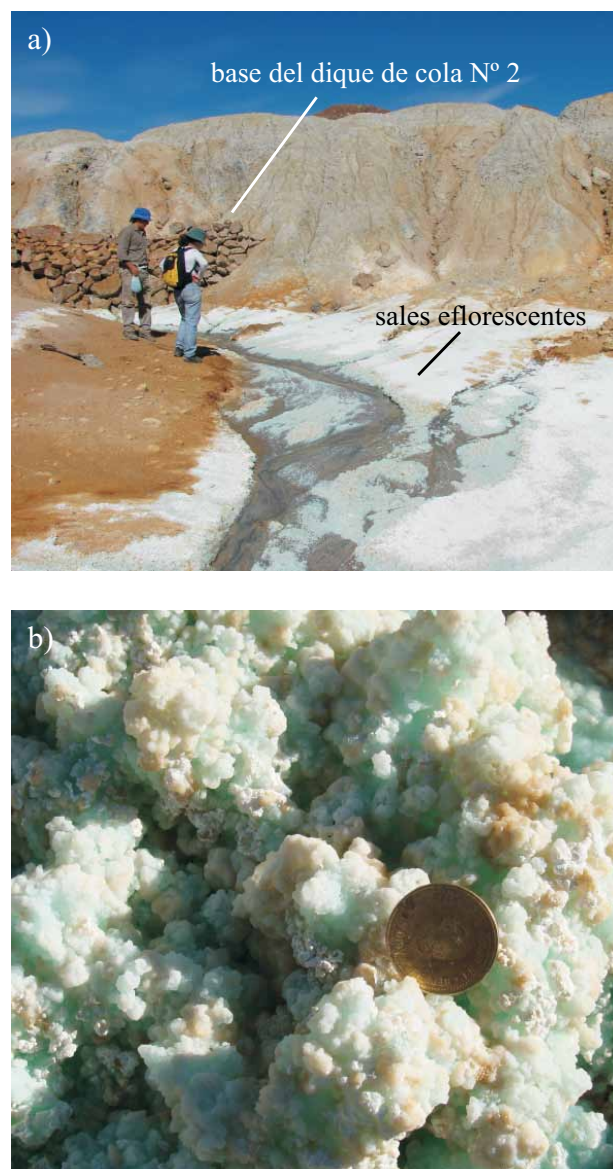


Figura 11. Sales eflorescentes en el pasivo Minero Pan de Azúcar. a: base de DC2. b: detalle de las sales.

Tabla 8. Metales pesados en la vegetación (parte aérea) del Pasivo Minero Pan de Azúcar (Plaza Cazón *et al.*, 2011).

Especie	Zn [mg·L <sup>-1</sup> ]	Pb [mg·L <sup>-1</sup> ]	Zn [mg·g <sup>-1</sup> ]	Pb [mg·g <sup>-1</sup> ]
<i>Deyeuxia brevistarata</i>	3.0 ± 0.002	1.5 ± 0.002	0.15	0.07
<i>Parastrephia lepidophylla</i>	0.9 ± 0.002	0.1 ± 0.004	0.04	0.005
<i>Parastrephia lucida</i>	0.6 ± 0.002	-	0.03	-
<i>Festuca argentinensis</i>	0.8 ± 0.003	0.8 ± 0.001	0.04	0.04
<i>Adesmia horrida</i>	7.3 ± 0.002	0.8 ± 0.000	0.36	0.04
<i>Distichlis scoparia</i>	4.2 ± 0.000	0.7 ± 0.002	0.21	0.037

de oxidación y alteración de sulfuros que ocurren en los desechos mineros en los que no se tomaron medidas de prevención al momento de cierre y/o abandono de la explotación. Los procesos de oxidación observados se encuentran en un estado avanzado luego de dos décadas del cese de actividades en las minas; existen todavía importantes volúmenes de material inalterado, por lo que se infiere que el potencial de generación de drenaje ácido es alto y la afectación al medio ambiente continuará en el tiempo hasta tanto no se tomen medidas de remediación y saneamiento de estos sitios.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Alejandro Nieva y Ricardo Pereyra, de la Universidad Nacional de Salta, por el preparado de muestras y análisis por FRX; a la guardaparque de Pozuelos Ana Sandobal y a Mauro de la Hoz por el apoyo en las tareas de campo. Este trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos CIUNSa N° 1674 y 1859.

## REFERENCIAS

- Argañaraz R.A., Sureda R.A., 1979, El yacimiento plumbífero "La Esperanza", departamento de La Poma, provincia de Salta, República Argentina: Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología, X (3-4), 1-11.
- Argañaraz R.A., Mancini J.E., Sureda R.J., 1982, El yacimiento La Concordia (Ag-Pb) en la provincia de Salta, Argentina: un proyecto privado de rehabilitación y explotación minera, en Quinto Congreso Latinoamericano de Geología: Argentina, Actas V, 61-78.
- Bernal J.P., Railsback, L.B., 2008, An introduction to the periodic table of the elements and their ions for Earth Sciences: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25, 236-246.
- Bianchi, A.R., Yañez, C.E., Acuña, L. R., 2005, Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste Argentino: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Centro regional Salta-Jujuy, 41 pp. <[http://www.ora.gov.ar/informes/atlas\\_noa\\_precipitaciones.pdf](http://www.ora.gov.ar/informes/atlas_noa_precipitaciones.pdf)>.
- Cacciabue, L., Arnoso, M., Kirschbaum, A., 2011, El pasivo ambiental Planta de tratamiento La Poma, Salta, Argentina: Caracterización geoquímica preliminar, en XVIII Congreso Geológico Argentino: Argentina, Actas, 1392-1393.
- Carver, J., 1971, Procedures in Sedimentary Petrology: Wiley & Sons, 653 pp.
- Collo, G., Do Campo, M., Astini, R.A., 2005, Caracterización mineralógica, microestructural e historia posdeposicional de la Formación La Aguadita, Sistema de Famatina, La Rioja, Argentina: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22, 283-297.
- Dold, B., 2010, Basic Concepts in environmental geochemistry of sulfide mine-waste management, en Sunil Kumar (ed.), Waste Management: InTech, open access book, 73-198, <<http://sciyo.com/books/show/title/waste-management>>.
- Dold, B., Fontboté, L., 2001, Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing: Journal of Geochemical Exploration, 74 (1-3), 3-55.
- Flores-Gutiérrez, D., Urrutia-Fucugauchi, J., Pérez-Cruz, L., Díaz-Hernández, R., Linares-López, C., 2010, Scanning electron microscopy characterization of iron, nickel and sulfur in chondrules from the Allende meteorite – further evidence for

- between-chondrules major compositional differences: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 27, 338-346.
- Jambor, J.L., 1994, Mineralogy of sulfide rich-tailings and their oxidation products, *en* Jambor J.L., Blowes D.W. (eds.), *Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste*: Mineralogical Association of Canada, Short Course, 22, 59-102.
- Kartinen E.O. Jr., Martin, C.J., 1995, An overview of arsenic removal processes: *Desalination* 103, 79-88.
- Lozano R., Bernal, J.P., 2005, Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22, 329-344.
- Mendoza-Amezquita, E., Armienta-Hernández, M.A., Ayora, C., Soler, A., Ramos-Ramirez, E., 2006, Potential lixiviation of trace elements in tailings from the mines La Asunción and Las Torres in the Guanajuato Mining District, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23, 75-83.
- Moore, D., Reynolds, R., 1989. *X ray diffraction and the identification and analysis of Clay Minerals*: Oxford University Press, 241-271, 321 pp.
- Nordstrom, D.K., 1982, Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals, *en* Kittrick, J.A., Fanning, D.S. (eds.), *Acid Sulfate Weathering*: Soil Sciences Society American Journal, 37-56.
- Nordstrom, D.K., Southam, G., 1997, Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation, *en* Banfield J.F., Nealson, K.H. (eds.), *Geomicrobiology-Interactions Between Microbes and Minerals*: Washington, D.C., Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, 35, 361-390.
- Nordstrom, D.K., Alpers, C.N., 1999, Geochemistry of Acid Mine Waters, *en* Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits: Part A. Processes, Methods, and Health Issues*: Littleton, CO, Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology*, 6A, 133-160.
- Palacios-Fest, M.R., Park, L.E., González-Porta, J., Palacios-Fest, M.R., Dix, G.R., 2003, Química de conchas de ostrácodos: una alternativa para medir la contaminación por metales de sistemas acuáticos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20, 139-153.
- Plaza-Cazón, J., Quiroga, M., Benítez, L., Donati, E., Kirschbaum, P., Murray, J., Kirschbaum, A., 2011, Acumulación de metales pesados en la vegetación del pasivo minero Pan de Azúcar, Puna de Jujuy, *en* XVIII Congreso Geológico Argentino: Argentina, *Actas*, 1400-1401.
- Ramos, V., 1999, Las Provincias Geológicas del Territorio Argentino: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, *Geología Argentina, Anales* 29 (3), 41-96.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., González-Hernández, G., 2007, Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico: *Applied Geochemistry* 22, 109-127.
- Santoyo, E., Santoyo-Gutiérrez, S., Verma, S.P., 2000, Trace analysis of heavy metals in groundwater samples by ion chromatography with post-column reaction and ultraviolet-visible detection: *Journal of Chromatography A* 884, 229-241.
- Segal, S. J., Caffè, P. J., 1999, El grupo minero Pan de Azúcar, Jujuy, *en* Zappettini E.O. (ed.), *Recursos Minerales de la República Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR: Buenos Aires, *Anales* 35, 1579-1592.
- Sureda, R. J., 1992, Zinkenita,  $Pb_6Sb_{14}S_{27}$ , de la Mina La Concordia, Salta, Argentina, *en* I Reunión de Mineralogía y Metalogenia, INREMI, La Plata: Argentina, 297-304.
- 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.
- Tonda, R., Kirschbaum, A., Arnosio, M., 2011, El pasivo minero La Concordia, puna de Salta: Concentración de metales pesados en la solución de poro del primer dique de colas, *en* XVIII Congreso Geológico Argentino: Argentina, *Actas* 1406-1407.

Manuscrito recibido: Noviembre 15, 2010

Manuscrito corregido recibido: Septiembre 11, 2011

Manuscrito aceptado: Octubre 18, 2011