



## **Impacto ambiental de la mina Pan de Azúcar sobre el río Cincel y la laguna de los Pozuelos**



**Wetlands**  
INTERNATIONAL

## Informe:

### *“Impacto ambiental de la mina Pan de Azúcar sobre el río Cincel y la laguna de los Pozuelos”*

*Dra. Jesica Murray<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Instituto de Bio y Geo Ciencias del NOA, CONICET-Universidad Nacional de Salta  
Av. 9 de Julio 14, Rosario de Lerma, Salta*

#### Resumen

La laguna de los pozuelos es un sitio importante de conservación de biósfera y el río Cincel es uno de sus principales tributarios. Este informe presenta por primera vez datos de la composición química del agua y sedimentos fluviales y lacustres del río Cincel y la laguna de los Pozuelos en estación húmeda. En enero de 2020 se realizó un muestreo con la toma de 10 muestras de agua y 20 de sedimentos fluviales y lacustres que fueron analizadas en laboratorios especializados. Los resultados muestran que las aguas del río Cincel en cuenca alta presentan anomalías naturales geogénicas en B, F, Li, Sr, As y otros metales tales como Zn, Cu, Pb, Cd y Sb dadas por la meteorización natural de rocas volcánicas en el sector sur de cuenca y depósitos de sulfuros en la Sierra de Rinconada. Estas concentraciones no representan valores tóxicos. Sin embargo, el brazo oeste del río Cincel y el río Peñas Blancas se ven afectados por la descarga del drenaje ácido de minas (DAM) de la mina Pan de Azúcar. El DAM posee un pH bajo (2.14) y elevadas concentraciones de  $S > Fe > Al > Zn > Mn > As > Cu > F > Pb > Cd$  que están por encima de límites permitidos para distintos usos. Los metales provenientes del DAM precipitan en los sedimentos fluviales y en la llanura de inundación del río Peñas Blancas y del brazo Oeste del río Cincel con valores que superan los límites guía para sedimentos fluviales en aguas dulces TEC y PEC para el As, Pb, Zn y TEC para Cd y Cu. En los sedimentos fluviales de la cuenca baja del río Cincel se observa un descenso en las concentraciones de metales favorecido por el aporte de los sedimentos limpios y frescos del brazo Este del río Cincel que actúa como atenuación natural. En la laguna, el agua presenta una composición Cl-Na comúnmente observada cuando se encuentra medianamente llena producto de la evolución geoquímica por la elevada evaporación y los valores de pH alcalinos. Las concentraciones de metales y trazas son altas, especialmente para B, Sr, F, Li y As y se asocian a un origen geogénico, el As podría estar asociado también al DAM. El origen y enriquecimiento de metales en la laguna están asociados a fuentes naturales y probablemente también antropogénicas por el aporte del DAM. Para poder diferenciar el aporte antropogénico de la mina Pan de Azúcar del aporte natural, sería necesario establecer el nivel de base geoquímico antes del inicio de la actividad minera a través del estudio de testigos de sedimentos lacustres. A partir de los resultados obtenidos, se brindan recomendaciones tendientes a la mitigación de la generación de DAM, a la remediación de la zona afectada y a la profundización de los estudios de los sedimentos lacustres.

## 1. Introducción

El presente informe se encuentra en el marco del proyecto de investigación “*Caracterización hidrológica y físico-química del río Cincel y de la laguna de Los Pozuelos*” iniciado en enero de 2020 dentro del *Programa Conservando los Humedales Altoandinos para la Gente y la Naturaleza*.

La laguna de Los Pozuelos ocupa la zona central de la depresión de la cuenca cerrada homónima. Se trata de una laguna de tipo playa (playa lake) ya que fluctúa estacionalmente (McGlue et al., 2012). Su superficie puede superar los 135 km<sup>2</sup> durante los años con precipitaciones superiores a la media y constituye un importante refugio de hábitat acuático dentro de una matriz desértica en los Andes Centrales. Toda la cuenca incluyendo la laguna conforma una Reserva de Biosfera.

Por ser un sistema de tipo playa los intervalos de sequía prolongada suelen provocar la desecación de la laguna. Durante este periodo, la exposición del lodo lacustre y la formación de costras de sales son comunes, pero no forma un depósito salino depósito como otros del Altiplano-Puna (Igarzábal, 1978, 1991).

Los ríos Santa Catalina y Cincel son los más importantes de la cuenca y descargan sus aguas en la laguna (Fig. 1), pero también recibe el aporte sub-superficial de las aguas las aguas subterráneas (Igarzábal, 1978). Estudios más recientes indican que de los dos ríos que alimentan la laguna el río Cincel es la principal fuente de agua superficial de la laguna tanto en estación húmeda como en estación seca (Paoli et al., 2011; Murray et al., 2019).

En el verano austral, el nivel de la laguna muestra una rápida recuperación con las precipitaciones y cuando está completamente llena alcanza una profundidad de aproximadamente 2 m en su centro (Igarzábal, 1978; McGlue et al., 2012, 2013). No solo se registran variaciones anuales asociadas a la estación seca y húmeda de la Puna, sino que también interanuales controladas por el fenómeno climático El Niño o ENSO (El Niño–*Southern Oscillation*) (Maggi y Navonne 2009). De acuerdo a estos autores durante la fase cálida (Niña) la laguna registra un aumento en su nivel de agua por el aumento de las precipitaciones, mientras que durante la fase fría (El Niño) se observan retracciones extremas de la laguna.

La química de las lagunas y salares en cuencas cerradas son el resultado de un complejo sistema en el que intervienen las precipitaciones, la meteorización, el agua subterránea, la evaporación, las reacciones de disolución y precipitación de minerales y la interacción con la biota (Jones y Deocampo 2005). Además, en la laguna de los Pozuelos, los fenómenos climáticos locales y globales incrementan la complejidad ya que impactan directamente en el volumen y flujo de agua que recibe generando un sistema químico complejo de una extrema variabilidad (Murray et al., 2019).

A pesar de la importancia de la laguna y del río Cincel, las características hidrológicas y físico-químicas de sus aguas se conocen principalmente para estación seca, mientras que, para estación húmeda, son muy limitadas o inexistentes. Conocer las características hidrológicas y físico-químicas del río Cincel durante el período estival es importante para comprender la

composición, calidad y cantidad de agua que alimenta la laguna y que influenciará en la composición de la misma.

Durante la estación húmeda uno de los afluentes principales del río Cincel es el río Peñas Blancas que influye principalmente en la composición físico-química de su brazo Oeste. Sobre el río Peñas Blancas descargan las aguas ácidas provenientes de la mina Pan de Azúcar (Fig. 1) las cuales pueden influir en la composición del río Peñas Blancas, la del brazo Oeste del río Cincel y consecuentemente en la laguna.

La oxidación de los sulfuros en los residuos mineros produce drenaje ácido de minas (DAM), que es uno de los problemas ambientales más frecuentes asociados a la minería y el principal problema ambiental que enfrentan las actividades mineras pasadas y presentes en todo el mundo (Nordstrom y Alpers, 1999; Blowes et al., 2014; Nordstrom et al., 2015; Dold, 2017).

Conocer los procesos que generan el DAM en cada sitio minero es fundamental para aplicar las estrategias de remediación adecuadas. De la misma manera, caracterizar las zonas afectadas es el primer paso para llevar adelante tareas de remediación. A través de la caracterización hidrológica y físico-química del río Cincel y la laguna de los Pozuelos en estación húmeda, realizada en este proyecto, fue posible identificar la descarga de drenaje ácido de minas sobre el río Peñas Blancas y los efectos sobre la calidad del agua y sedimentos del río Cincel y la laguna de Los Pozuelos. A partir de los resultados obtenidos, se brindan una serie de recomendaciones tendientes a la mitigación de la generación de DAM, a la remediación de la zona afectada y a la profundización de los estudios de los sedimentos lacustres.

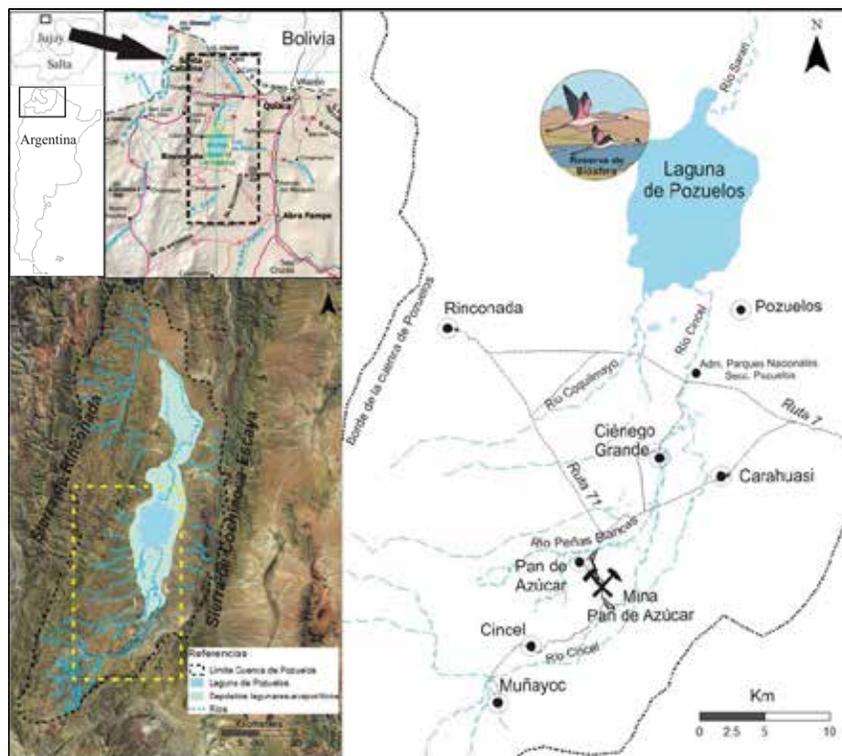


Figura 1. Ubicación de la Cuenca de Pozuelos y el área drenada por el río Cincel.

## 2. OBJETIVOS

Determinar las características hidrológicas y físico-químicas del río Cincel y la laguna de los Pozuelos en estación húmeda. En base a la caracterización, identificar el impacto de la descarga de drenaje ácido de minas sobre los ríos Peñas Blancas, Cincel y la laguna de Los Pozuelos.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Fechas de muestreo

La campaña de muestreo se realizó entre el 19 y el 30 de enero de 2020.

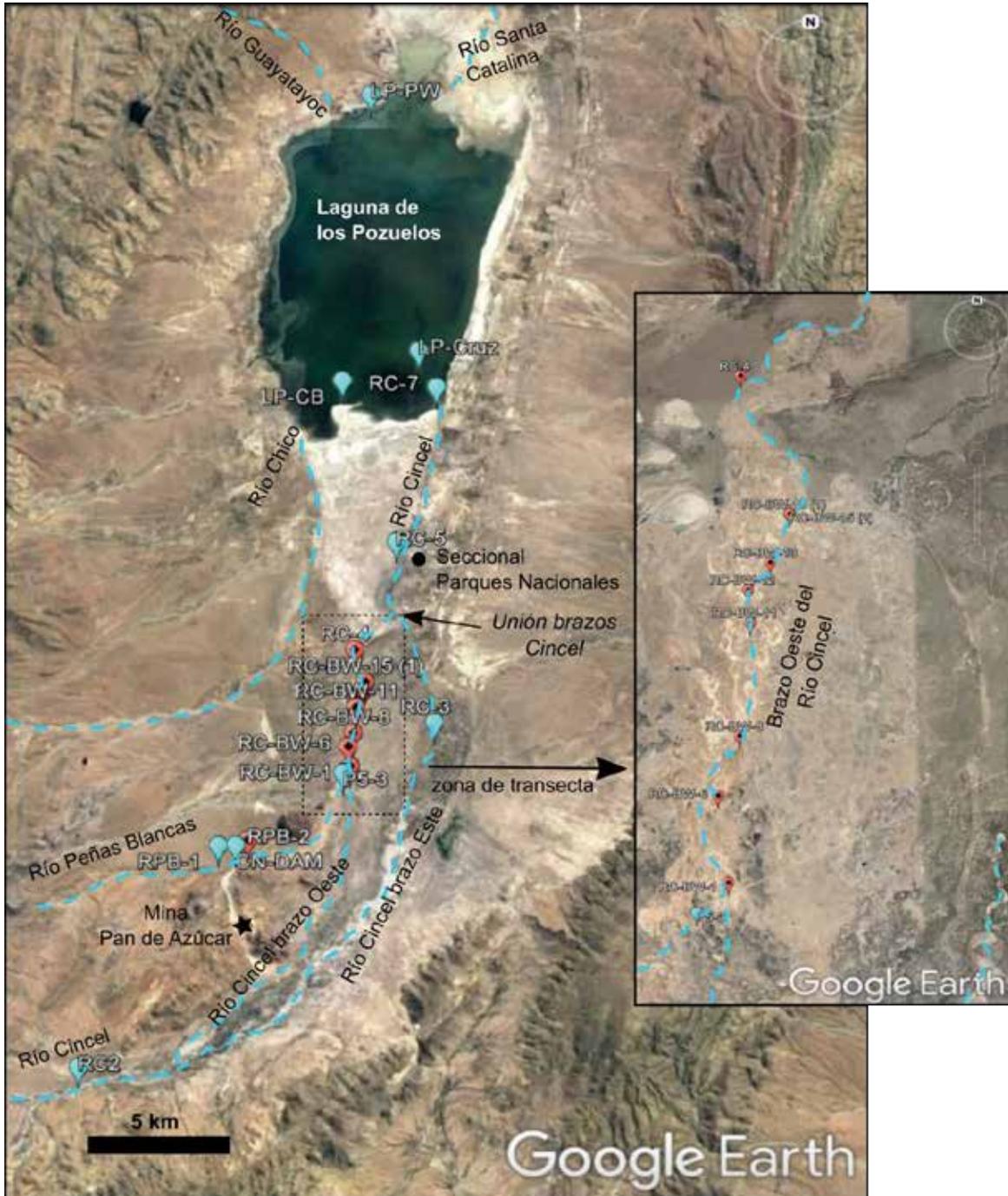
### 3.2. Muestreo y análisis de agua

Durante el muestreo se tomaron 10 muestras de agua: 4 en el río Cincel, 2 en el río Peñas Blancas, 1 en el drenaje de la mina Pan de Azúcar en el punto de descarga sobre el río Peñas Blancas y 3 en la laguna (Fig. 2). En cada punto se midieron cuando fue posible el caudal en ríos y la profundidad del pelo de agua en la laguna. Además, se determinaron los parámetros físico-químicos de pH, conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{L}$ ), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Eh (mV) y sólidos disueltos totales (ppm) tanto en los sitios muestreados como en otros de interés (río Santa Catalina, río Chico, puntos sobre el brazo Oeste del río Cincel) (Tabla 1 y 2, Anexo 1). Estos parámetros fueron determinados con equipamiento multi-paramétricos de campo (Lutron WA-2017SD, Hanna HI98128 y Hanna HI98311).

Cada muestra de agua se dividió en 3 alícuotas para sus respectivos análisis en laboratorio (1-cationes; 2-aniones y alcalinidad; 3-especies de arsénico y hierro). Las muestras fueron filtradas con filtros de  $0,45\ \mu\text{m}$  de diámetro de poro, exceptuando la muestra de drenaje de mina que se filtró con  $0,2\ \mu\text{m}$  para reducir al máximo la coagulación de partículas en suspensión y precipitación de minerales de hierro en el recipiente de muestreo. Las muestras de cationes se conservaron en botellas de polietileno de 60 ml a las que se le agregó  $0,6\ \text{ml}$  de  $\text{HNO}_3$  para mantener los cationes en solución (las botellas fueron previamente lavadas con  $\text{HNO}_3$  al 5% y enjuagadas con agua destilada ultra pura). Las muestras de aniones y alcalinidad se conservaron en botellas de polietileno de 250 ml previamente lavadas con agua destilada ultra pura. Las muestras para la determinación de especies de arsénico y hierro fueron conservadas en botellas de 125 ml y acidificadas con  $1,25\ \text{ml}$  de  $\text{HCl}$  6M para preservar el estado de oxidación original de ambos elementos. Todas las muestras se colocaron en conservadoras con packs refrigerantes durante el muestreo y se mantuvieron en heladera hasta su envío.

Las muestras se analizaron en el laboratorio del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en Boulder, Colorado. Los cationes mayoritarios y elementos traza fueron analizados con equipo PerkinElmer 7300 DV de espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés). Los aniones mayoritarios fueron analizados con cromatógrafo iónico Dionex DX 600. La alcalinidad fue determinada con titulador automático (Thermo, 940-960) usando  $0.01\ \text{N}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$  estandarizado. Las concentraciones de hierro disuelto total (Fe(T)) y hierro ferroso (Fe(II)) fueron determinadas por colorimetría con espectrofotómetro (Hewlett Packard 8453 diode array UV/VIS) utilizando el método de FerroZine (To et al., 1999), el hierro férrico (Fe(III)) fue calculado por diferencia. Las concentraciones de arsénico total (As(T))

y arsenito (As(III)) se determinaron con equipo Perkin Elmer (FIAS 100) de espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros (HG-AAS, por sus siglas en inglés) utilizando el método descrito por McCleskey et al. (2003). El balance de cargas o error informado por el laboratorio es  $< \pm 5\%$  en todos los casos (Tabla 3, Anexo 1).



**Figura 2.** Mapa de ubicación de los puntos de muestreo. Los marcadores celestes indican los sitios de muestreo de agua + sedimentos y los marcadores rojos los sitios donde solo se tomaron muestras de sedimentos (transecta de ~5 km).

### **3.3. Muestreo y análisis de sedimentos fluviales y lacustres**

Se tomaron en total 20 muestras de sedimentos fluviales, de las cuales 10 corresponden a los sitios en los que se tomaron las muestras de agua y 10 al brazo Oeste del río Cincel aguas abajo de la unión con el afluente Peñas Blancas (Fig. 2). En dicho sector, el bajo caudal de agua asociado a las escasas precipitaciones permitió realizar una transecta de ~5 km en donde sólo se tomaron muestras de sedimentos fluviales.

En cada sitio se tomaron aproximadamente 2 Kg de sedimentos que se preservaron en bolsas de plástico selladas con precintos. En los ríos con agua y en la laguna, la muestra se tomó por debajo del pelo de agua utilizando una pala de plástico. En los sitios donde no había agua (transecta), algunas muestras se tomaron sobre el canal de escurrimiento actual y otras en las llanuras de inundación (Tabla 1, Anexo 2).

En gabinete, las muestras fueron colocadas en bandejas de plástico y secadas a temperatura ambiente. Luego se cuartearon para obtener fracciones de entre 500 g y 1 Kg que fueron enviadas al laboratorio ALS, Mendoza. En el laboratorio las muestras fueron tamizadas en seco con malla 180  $\mu$  (método PREP-41). El pasante fue analizado con el método ME-ICP41 que consiste en una digestión ácida y posterior análisis con espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES, por sus siglas en inglés) y espectrometría de masa de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés). El análisis provisto por el laboratorio, así como los límites de detección de los elementos analizados se presentan en el Anexo 2.

## **4. Resultados**

### **4.1. Caracterización físico-química de las aguas**

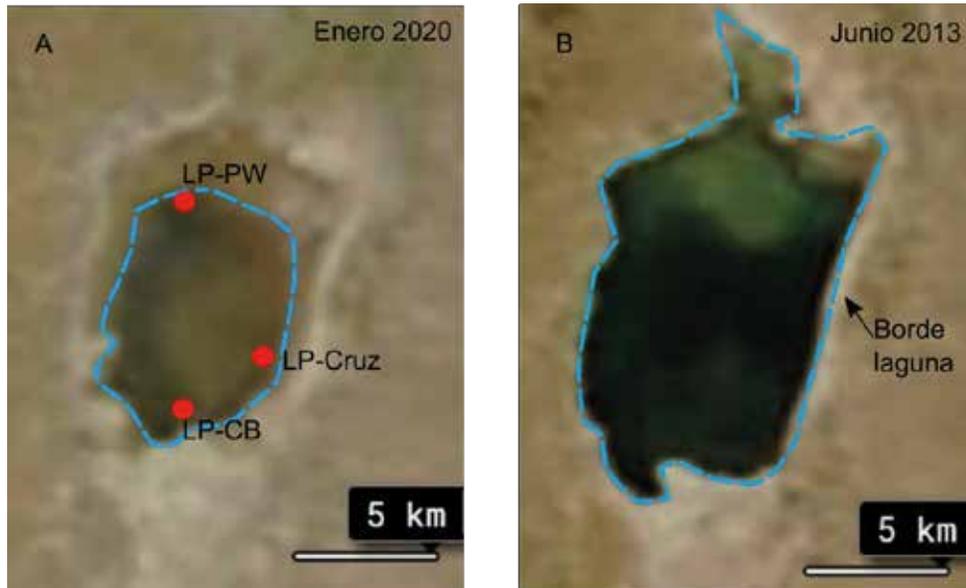
#### **4.1.1. Caudales de río y tamaño de la laguna**

En la cabecera del río Cincel el caudal determinado fue de 2,66 m<sup>3</sup>/s (RC-2), considerablemente mayor al caudal de estación seca que varía entre 0,13 y 0,52 m<sup>3</sup>/s (Murray et al., 2019). Cabe destacar que, en este tramo inicial del río, su descarga es permanente y con amplias variaciones estacionales tal como los datos lo indican. En su tramo de cuenca media en donde el río Cincel se divide en dos brazos principales (un brazo hacia el Este y otro hacia el Oeste), se determinó un valor de 1,29 m<sup>3</sup>/s para el brazo Este (RC-3), mientras que el brazo Oeste no presentaba escurrimiento superficial, solamente algunos charcos sobre el cauce remanentes de crecientes previas y asociadas a las primeras lluvias de diciembre-enero.

En el tramo de cuenca baja y descarga en la laguna se determinó un caudal menor de 0,35 m<sup>3</sup>/s a la altura de la seccional de Parques Nacionales (RC-5), que denota la infiltración del río a lo largo de su curso. También se determinaron los caudales de los ríos Santa Catalina y Chico en su desembocadura. Los valores arrojados fueron de 4,75 m<sup>3</sup>/s y 0,02 m<sup>3</sup>/s respectivamente indicando el gran aporte del río Santa Catalina en el sector norte de la laguna.

En cuanto al tamaño de la laguna, presentaba una superficie de aproximadamente 48 km<sup>2</sup> (Fig. 3 A). En períodos con precipitaciones estivales mayores o cercanas a la media la laguna puede exceder los 135 km<sup>2</sup> (Igarzábal, 1978), un ejemplo fue el año 2013 (Fig. 3 B). Al momento

del muestreo en enero de 2020, la superficie ocupada por el cuerpo de agua demuestra las bajas precipitaciones acumuladas hasta ese momento.



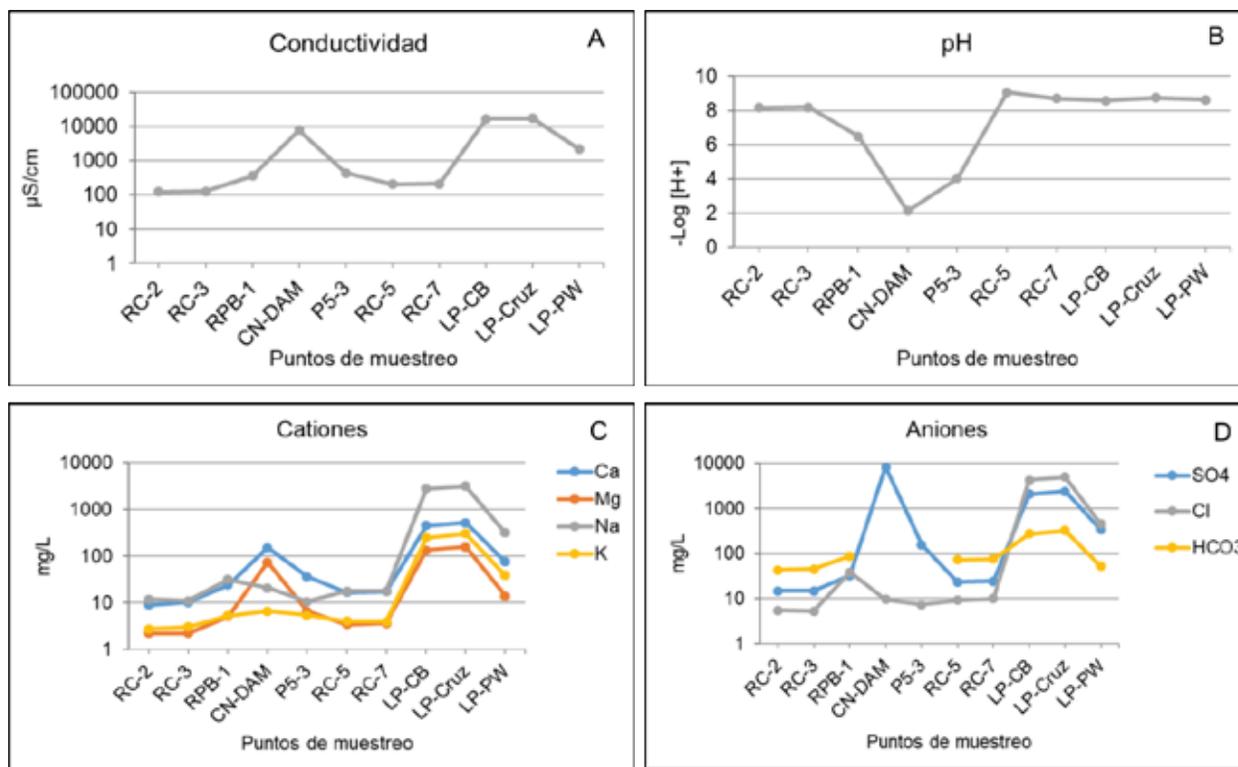
**Figura 3.** Vista de la laguna y superficie cubierta de agua tomadas del sitio web de la NASA: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> A)- Laguna al momento del muestreo en enero de 2020, en rojo los puntos de muestro. B)- Año 2013 con precipitaciones mayores o cercanas a la media.

#### 4.1.2. Conductividad

Con respecto a la conductividad, el río Cincel presenta un aumento desde la cabecera hasta su descarga en la laguna (Fig. 4 A). En sus nacientes posee una conductividad baja de  $125 \mu\text{S}/\text{cm}$  que alcanza un valor de  $213 \mu\text{S}/\text{cm}$  en la desembocadura. Por su parte, el afluente Peñas Blancas posee una conductividad de  $355 \mu\text{S}/\text{cm}$  que además incrementa por la influencia del drenaje ácido de minas (DAM) de la antigua mina Pan de Azúcar cuyo valor es de  $7.790 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Aguas debajo de la descarga de DAM la conductividad alcanza un valor de  $437 \mu\text{S}/\text{cm}$  en la llanura de inundación (P3-5).

El brazo Oeste del río Cincel también incrementa su conductividad en la unión con el río Peñas Blancas por efecto del DAM alcanzando los  $413 \mu\text{S}/\text{cm}$  (Muestra RC-BW-1, Tabla 2). Luego, disminuye hasta un valor de  $258 \mu\text{S}/\text{cm}$  en el punto RC-4 y de  $205 \mu\text{S}/\text{cm}$  en el sitio RC-5 al unirse nuevamente con el brazo Este.

Los ríos Santa Catalina y Chico poseen conductividades de  $160,4$  y  $312 \mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente en su descarga en la laguna.



**Figura 4.** Variación de los parámetros físico-químicos de las muestras de agua. Los puntos de muestreo están ordenados desde la cuenca alta del río Cincel hasta el depocentro de cuenca en la laguna. A)- Conductividad. B)- pH. C)- Concentración de cationes mayoritarios. D)- Concentración de aniones mayoritarios.

Las muestras de la laguna tomadas en el sector sur (LP-CB y LP-Cruz) son similares entre sí con valores de 16.720 y 17.150  $\mu\text{S/cm}$ . La conductividad disminuye hacia el sector norte de la laguna en el sector de la península con un valor de 2.120  $\mu\text{S/cm}$  (LP-PW). Este descenso en la conductividad que indica un agua más diluida podrían estar relacionado a la descarga del río Santa Catalina cuyo caudal era el doble a del río Cincel durante el muestreo.

Por sus valores de salinidad (1050 – 8500 ppm), las muestras de la laguna se clasifican como salobres (entre 1000 - 10.000 ppm según Kharaka y Hanor, 2003).

#### 4.1.3. pH

Los valores de pH (Fig. 4 B) en el río Cincel son de 8,15 en sus nacientes (RC-2) y de 8,18 en la cuenca media sobre el brazo Este (RC-3). Los valores más bajos los presenta el DAM con un valor de 2,14 (CN-DAM). El río Peñas Blancas posee un pH de 6,49 (RPB-1) aguas arriba de la descarga de DAM y disminuye a valores de 6,02 (RPB-2) y 4,04 (P5-3) aguas abajo de la descarga de DAM.

El valor de pH del brazo Oeste del río Cincel aguas abajo de la unión con el río Peñas Blancas es de 5,86 (RC-BW-1) denotando también la influencia del DAM. Luego, en el punto RC-4 el pH en el brazo Oeste del Cincel se midió un valor cercano a neutro de 6,81 (Fig. 4 B).

En la cuenca baja donde se unen nuevamente los dos brazos de río Cincel el pH es de 9,07 (RC-5) y de 8,7 en la desembocadura (RC-7).

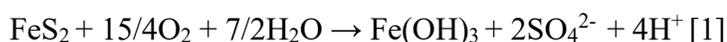
En cuanto a la laguna, presenta valores de pH prácticamente alcalinos y homogéneos entre 8,57 y 8,75.

#### **4.1.4. Composición química**

##### ***Iones mayoritarios***

En el río Cincel las concentraciones de cationes y aniones mayoritarios varían de la siguiente manera:  $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{F} > \text{NO}_3 > \text{PO}_4$  y  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$  (Fig. 4 C y D). Predominando los iones Na-Ca- $\text{HCO}_3$  conformando un agua de tipo bicarbonatada con variaciones en sodio y calcio. En general las concentraciones de Na varían de 12 a 18 mg/L y las de Ca entre 8,93 a 17,5 mg/L, siendo menores a las observadas en estación seca (Murray et al., 2019) debido a que se encuentran más diluidas por las precipitaciones. Este tipo de agua Na-Ca- $\text{HCO}_3$  es común en ambientes áridos y valores altos de pH como los que presenta el río Cincel. La presencia de Ca dominante en cuenca alta y media (RC-2 y RC-3) indica que a pesar de los valores altos de pH de río aún hay disolución de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (valor de saturación de calcita  $\text{IS} < 1$ , Tabla 4, Anexo 1).

En el río Peñas Blancas, se observa la influencia del drenaje ácido de minas ya que pasa de una composición de tipo Na-Ca- $\text{HCO}_3$  aguas arriba de la mina (RPB-1) a una composición tipo Ca- $\text{SO}_4$  (P3-5) aguas abajo de la descarga de DAM. El DAM posee una composición de tipo Fe-Al- $\text{SO}_4$  en donde el Fe y el  $\text{SO}_4$  provienen de la oxidación de sulfuros en los desechos mineros, principalmente pirita, y el Al de la disolución de aluminosilicatos a pH ácido. En la reacción neta de oxidación de pirita [1] se produce la liberación de hierro, sulfato y protones que son los responsables de la disminución del pH del agua y del aumento en la solubilidad de metales (Dold, 2010; Lottermoser, 2010; Nordstrom et al., 2015):



En la cuenca baja el río Cincel conserva que su composición se enriquece en Na (Na- $\text{HCO}_3$ ) ya que la calcita comienza a precipitar ( $\text{IS} < 1$ ) reteniendo el Ca en la fase sólida.

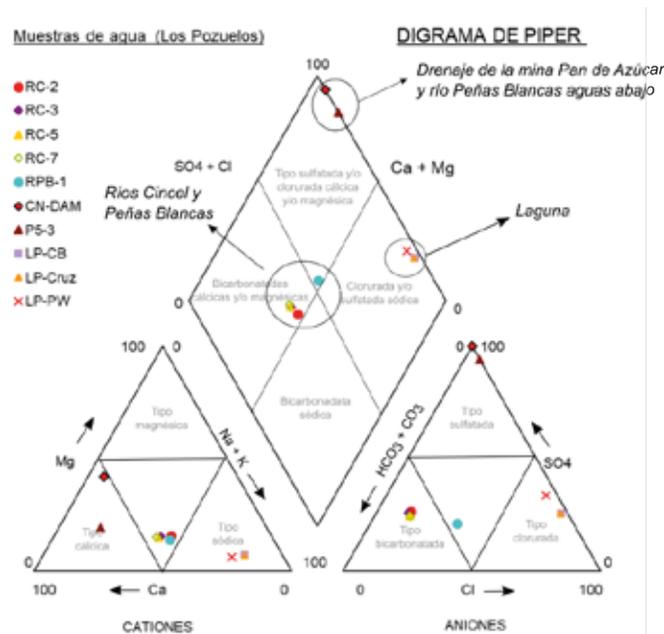
En cuanto a la laguna, los iones mayoritarios varían de la siguiente manera  $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$  y  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ . Por el dominio de Na y Cl se trata de una composición de tipo clorurada-sódica (Na-Cl) en los tres sitios muestreados. Esta característica química ha sido observada en muestreos previos cuando la laguna posee abundante agua como los años 2013 y 2015 (Murray et al., 2019).

La composición Na-Cl que presenta la laguna es el resultado de la evolución geoquímica del agua por la elevada evaporación en donde minerales más insolubles como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) precipitan secuestrando Ca, Mg,  $\text{CO}_3$  y  $\text{SO}_4$  quedando los elementos más solubles como Na y Cl en solución. Los índices de saturación para calcita y magnesita indican que estos minerales precipitan ( $\text{IS} > 0$ ), mientras que el yeso con un valor de IS

$< 0$  no llegaría a saturar para precipitar, aunque está muy cerca del equilibrio y tampoco la halita ( $IS \ll 0$ ).

En cuanto los efectos de la descarga de DAM sobre la composición de iones mayoritarios de la laguna, podría estar evidenciada por el aumento en la concentración del anión  $SO_4$  especialmente en las muestras del sector sur. Sin embargo, estudios previos muestran que el aporte de  $SO_4$  a la laguna también tiene un origen natural relacionado a la meteorización de sulfuros presentes en vetas mineralizadas con sulfuros y oro en la Sierra de Rinconada (Rodríguez et al., 2001). El  $SO_4$  es aportado también por los ríos Santa Catalina y Guayatayoc en el sector norte de la laguna y el río Chico o Colquimayo en el sur (Murray et al., 2019).

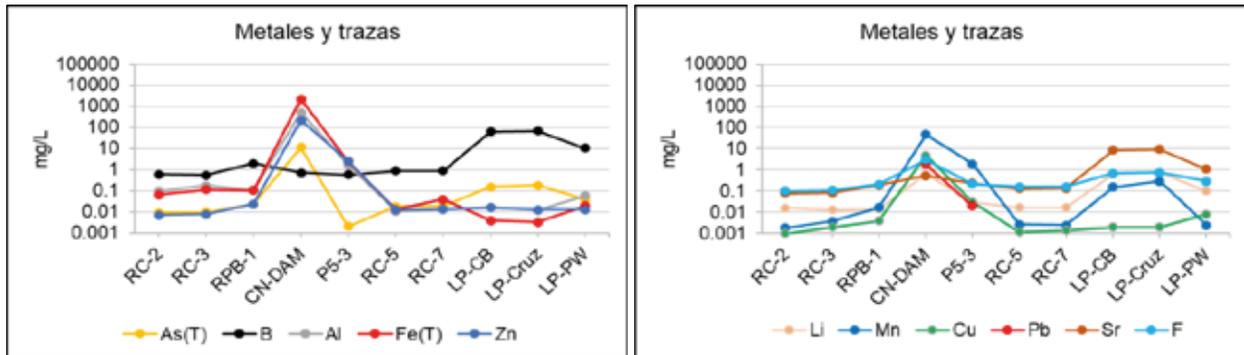
En el diagrama de Piper (Fig. 5) para la clasificación química de las aguas, se observa cómo se agrupan las muestras en función de su similitud composicional y su evolución geoquímica. Puede verse que las aguas de los ríos Cincel y Peñas Blancas (éste último aguas arriba de la mina Pan de Azúcar) guardan una similitud composicional, evolucionando de  $Na-Ca-HCO_3$  a  $Na-Cl$  en la laguna. En el extremo de  $SO_4$  se encuentra la muestra de DAM (CN-DAM) y la muestra del río Peñas blancas aguas abajo de la mina que recibe la descarga del DAM (P5-3). Estas dos muestras se alejan composicionalmente de todas las otras evidenciando el aporte de  $SO_4$  por parte del DAM que tiene una en la oxidación de sulfuros en los desechos mineros. La muestra del extremo norte de la laguna (LP-PW) también muestra un incremento relativo de  $SO_4$  en comparación con las otras, lo que podría estar dado por el aporte de  $SO_4$  en solución por el río Santa catalina y río Guayatayoc.



**Figura 5.** Diagrama de Piper para las muestras de agua superficial de la Cuenca de Pozuelos.

## Metales y trazas

Con respecto a los metales y elementos traza presentes en las aguas, se observa que los más abundantes en orden relativo son boro (B), estroncio (Sr), flúor (F), aluminio (Al), hierro (Fe), litio (Li), arsénico (As), cinc (Zn) manganeso (Mn), cobre (Cu) y plomo (Pb) (Tabla 5, Anexo 1 y Fig. 6).



**Figura 6.** Variación de la concentración de metales y elementos traza en las muestras de agua superficial. Los puntos de muestreo están ordenados desde la cuenca alta del río Cincel hacia la laguna en el centro de cuenca.

Las muestras de agua de la cabecera del río Cincel (RC-2), el brazo Este del río Cincel en cuenca media (RC-3) y el río Peñas Blancas aguas arriba de la mina Pan de Azúcar (RPB-1) muestran concentraciones que denotan las anomalías ya existentes en la cuenca para As (0,01 mg/L); B (0,6 mg/L), F (0,1 mg/L), Li (0,02 mg/L); Sr (0,07 mg/L) y en menor medida para el Zn (0,007 mg/L). Estos valores son mayores a los valores promedios de los ríos del mundo en donde: As = 0,0006 mg/L; B = 0,010 mg/L; Li = 0,002 mg/L; Sr = 0,06 mg/L; Zn = 0,0006 mg/L (Gaillardet et al., 2003). Estas anomalías en el río Cincel son naturales o de origen geogénico relacionadas a la meteorización y lixiviado de rocas portadoras de estos elementos en el sector sur de la cuenca. Se trata tanto de rocas volcánicas como en otras regiones de la Puna (Alonso et al., 1991), como de lutitas con mineralizaciones de oro y sulfuros polimetálicos vetiformes en la Sierra de Rinconada (Rodríguez et al., 2001; Murray et al., 2019).

En cuanto a la muestra de DAM (CN-DAM), es extremadamente anómala en metales tales como: Fe (2195 mg/L); Al (506 mg/L); Zn (221 mg/L); Mn (47 mg/L); As (11,5 mg/L); Cu (4,9 mg/L); F (3,02 mg/L); Pb (1,9 mg/L) y Cd (1,23 mg/L) (Fig. 6). Esta elevada concentración de metales tiene un origen en la oxidación de sulfuros y disolución de silicatos presentes en los diques de colas de la mina Pan de Azúcar (Murray et al., 2014; Murray et al., 2021). El bajo pH de esta muestra (2,14) permite que los metales se mantengan en solución y puedan migrar con el escurrimiento del drenaje ácido.

La descarga de DAM sobre el río Peñas Blancas genera un incremento en las concentraciones de metales sobre éste último. Son notorias en la muestra P5-3 tomada aguas abajo sobre la llanura de inundación las concentraciones altas de Fe (2,49 mg/L); Zn (2,53 mg/L); Mn (1,94 mg/L); Al (1,7 mg/L); Cu (0,031 mg/L); Cd (0,021 mg/L); Pb (0,02 mg/L). El valor bajo de

pH de esta muestra (4,04) también denota la influencia del DAM y es lo suficientemente bajo para mantener los metales en solución. También, con estos valores de pH de 4,04 óxidos-hidróxidos de Fe tales como goethita ( $IS > 0$ , Tabla 4, Anexo1) alcanzan el equilibrio para precipitar y en el proceso adsorben metales de la solución que quedan retenidos en los sedimentos fluviales. El efecto de sorción es especialmente notorio para el As, un metaloide muy sensible a las variaciones de pH y a la precipitación de minerales secundarios de Fe. Las bajas concentraciones de As (2  $\mu\text{g/L}$ ) en la muestra P5-3, muy inferiores a las del DAM e incluso inferiores a las del río Peñas Blancas aguas arriba de la mina (RPB-1, As = 23,5  $\mu\text{g/L}$ ) se explican por la co-precipitación en minerales secundarios de Fe como goethita. Contrariamente, a pH alcalinos, como los de la muestra del río Peñas Blancas aguas arriba de la mina, o a pH muy bajos como el del DAM el As tiene una tendencia a permanecer en solución y por tal motivo sus concentraciones son mayores.

Hacia la cuenca baja del río Cincel, se observa que las muestras RC-5 y RC-7 poseen concentraciones de metales similares a los de cuenca media (RC-3) y alta (RC-2), excepto por el As que incrementa a valores de 18 y 18,7  $\mu\text{g/L}$  asociado al pH alcalino del río que permite su solubilidad. Cabe destacar que, en el momento del muestreo, los puntos RC-5 y RC-7 recibían solamente la descarga del brazo Este del río Cincel principalmente y no del brazo Oeste debido a su nulo caudal ya que las lluvias no eran lo suficientemente pronunciadas. Por este motivo, los efectos del DAM en el agua de los puntos RC-5 y RC-7 no pueden establecerse claramente.

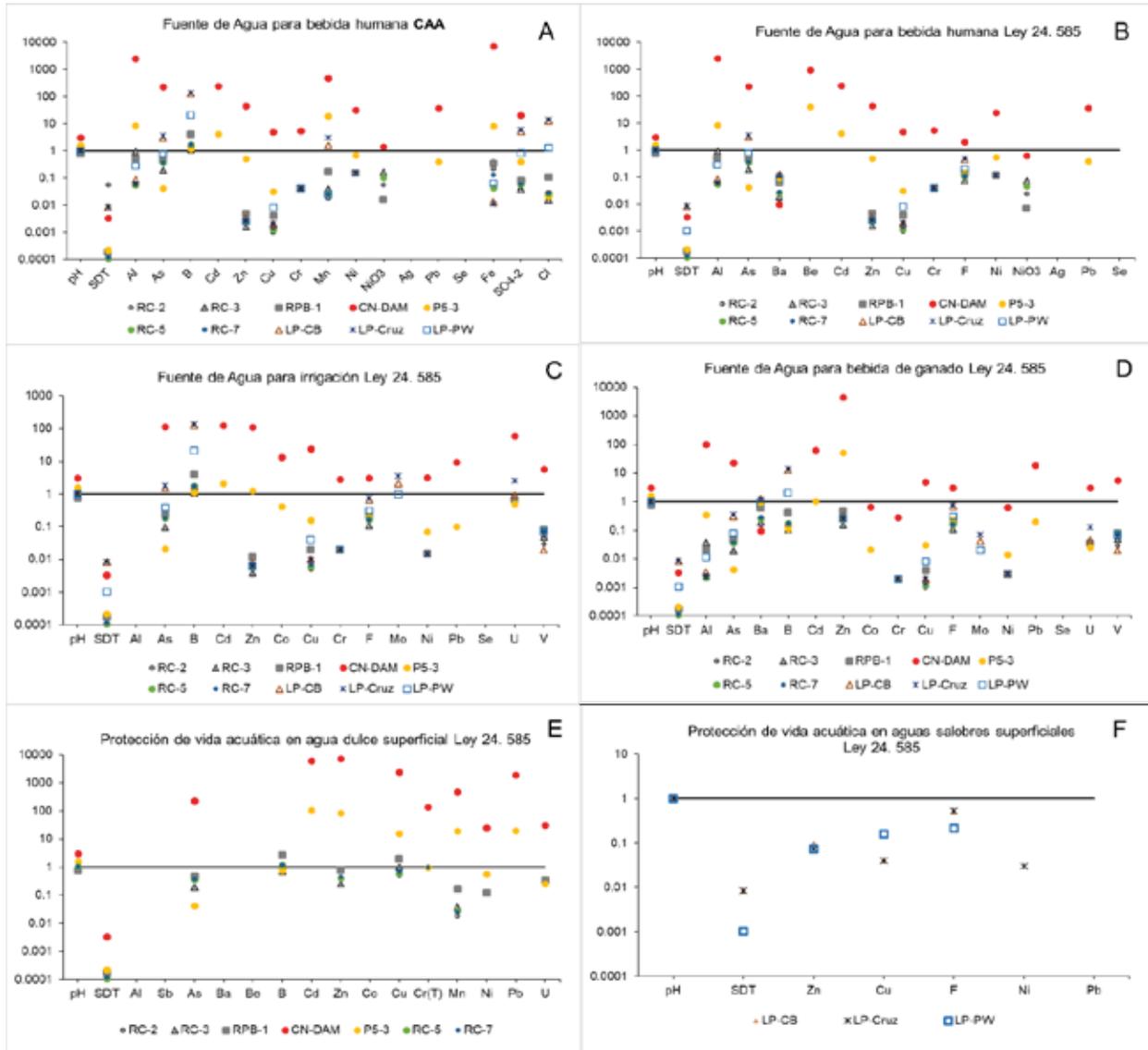
En cuanto a la laguna, se observa que las concentraciones de los metales y trazas son elevadas, especialmente para el B (10,4 – 68,8  $\text{mg/L}$ ), Sr (1,1 – 9,3  $\text{mg/L}$ ), F (0,3 – 0,75 $\text{mg/L}$ ); Li (0,1 – 0,79  $\text{mg/L}$ ) y As (38,6 – 180  $\mu\text{g/L}$ ). Las concentraciones altas en estos elementos son comunes también en otros salares de la Puna y se asocian a un origen natural o geogénico, específicamente a la meteorización de rocas volcánicas con alteraciones hidrotermales muy comunes en la Puna (Alonso et al., 1991). Se puede decir que en Pozuelos estos elementos tendrían un origen similar ya que el río Cincel también los presenta en su cabecera con un origen asociado a rocas volcánicas y a las mineralizaciones de sulfuros en la Sierra de Rinconada. Para el As también puede haber un origen en el DAM de Pan de Azúcar (Murray et al., 2019). Las concentraciones de otros metales tales como Cd, Co, Ni, Pb y Sb están por debajo de los límites de detección y las de Cu (0,002 – 0,008  $\text{mg/L}$ ), Cr (0,002  $\text{mg/L}$ ) y Zn (0,0163 – 0,0127  $\text{mg/L}$ ) son similares a las del río Cincel en cuenca alta (RC-2) y media (RC-3) y al río Peñas blancas antes de la descarga del DAM. Las muestras del sector norte (LP-PW) de la laguna presentan concentraciones menores que las del sector sur (LP-CB y LP-Cruz), lo que podría estar asociado a un efecto de dilución por el abundante caudal aportado por el río Santa Catalina en comparación al río Cincel. A su vez, la muestra de LP-Cruz (la de mayor conductividad) es la que muestra las mayores concentraciones de metales y trazas entre las tres muestras.

#### ***4.1.5. Comparación con niveles guía nacionales de calidad de agua para diferentes usos***

En la Figura 7 se comparan las muestras con los niveles guía nacionales dados por el Código Alimentario Argentino (CAA) y por la Ley 24.585 de Protección Ambiental para la actividad minera.

Se destaca que las muestras del drenaje ácido (CN-DAM) y la muestra del río Peñas Blancas alcanzada por el DAM (P5-3) sobrepasan los valores guía para todos los tipos de usos y para la protección de la vida acuática en aguas dulces.

Las muestras de la laguna (clasificadas como aguas salobres) sólo se graficaron en la Figura 7, B que presenta la comparación con los niveles guía para la protección de la vida acuática en aguas salobres superficiales. Las mismas se encuentran dentro de los límites permitidos.



**Figura 7.** Comparación con los niveles guía nacionales. A)- Código Alimentario Argentino (CAA). B, C, D, E, F)- Ley 24.585 de Protección Ambiental para la actividad minera. Diagramas normalizados, en donde los puntos con valores mayores a la unidad (representada por la línea de trazo negro) se encuentran por encima del valor guía.

## 4.2. Caracterización geoquímica de sedimentos fluviales y lacustres

En la Figura 8 se grafican las concentraciones de elementos mayoritarios y metales y trazas en los sedimentos fluviales y lacustres.

Se observa que los valores de base del río Cincel (RC-2 y RC-3) y del río Peñas Blancas (RPB-1) incrementan significativamente a partir del aporte del DAM (muestras RPB-2 a RC-4) tanto para elementos mayoritarios (Fig. 8 A) como para metales y trazas (Fig. 8 A y B). Mientras que, en la cuenca baja del río Cincel (RC-5 y RC-7) hay una disminución de las concentraciones a valores muy similares a los de cuenca alta y media. Las concentraciones de elementos mayoritarios, metales y trazas vuelven a incrementarse en la laguna.

### 4.2.1. Factor de enriquecimiento

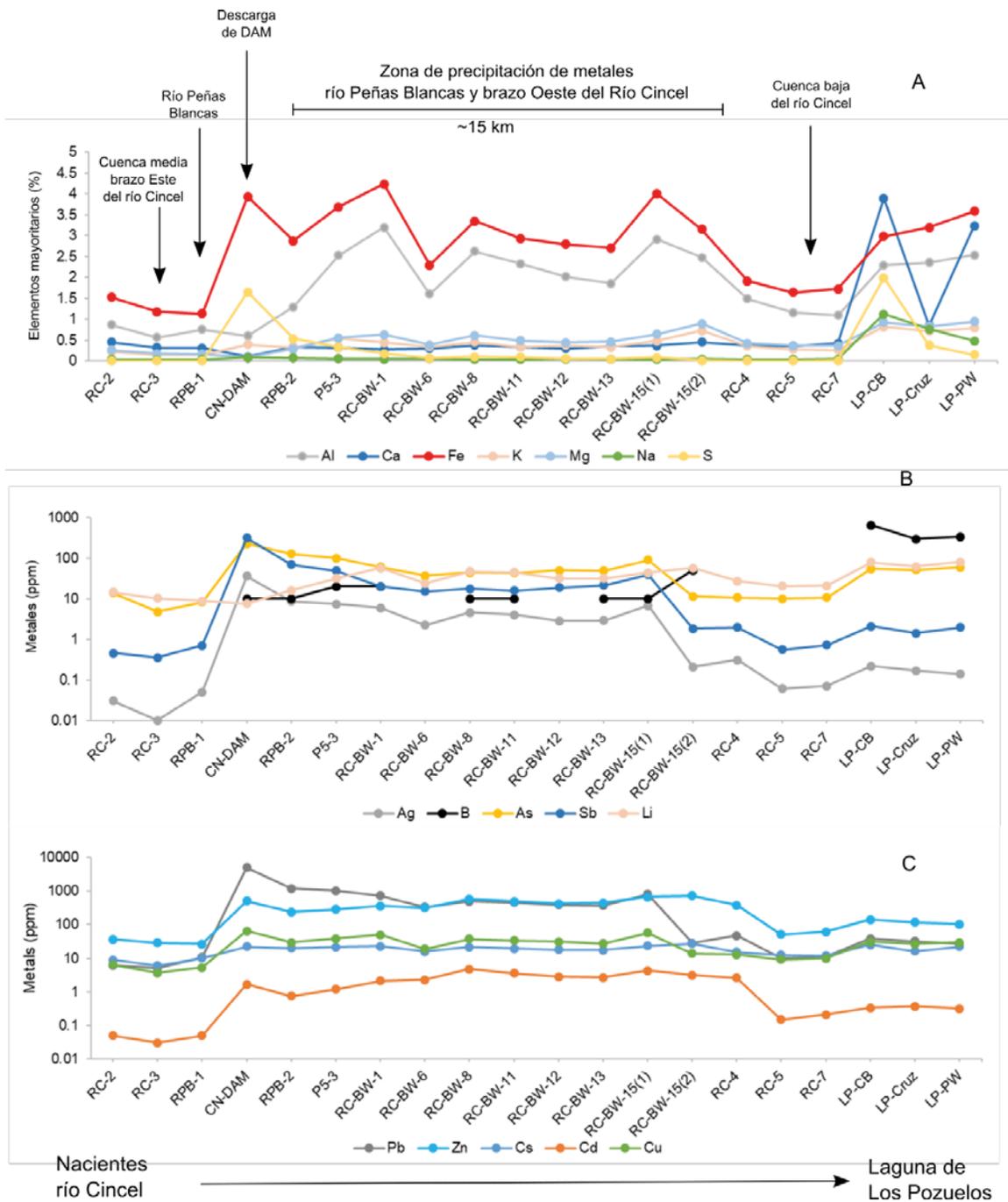
Para evaluar el impacto antropogénico en la concentración de metales (Me) en los sedimentos fluviales y lacustres se calculó el Factor de Enriquecimiento (FE) utilizando el titanio (Ti) como elemento de referencia conservativo y la muestra RC-3 como *background* o nivel de base en la siguiente ecuación:

$$FE = (Me/Ti)_{muestra} / (Me/Ti)_{background (RC-3)}$$

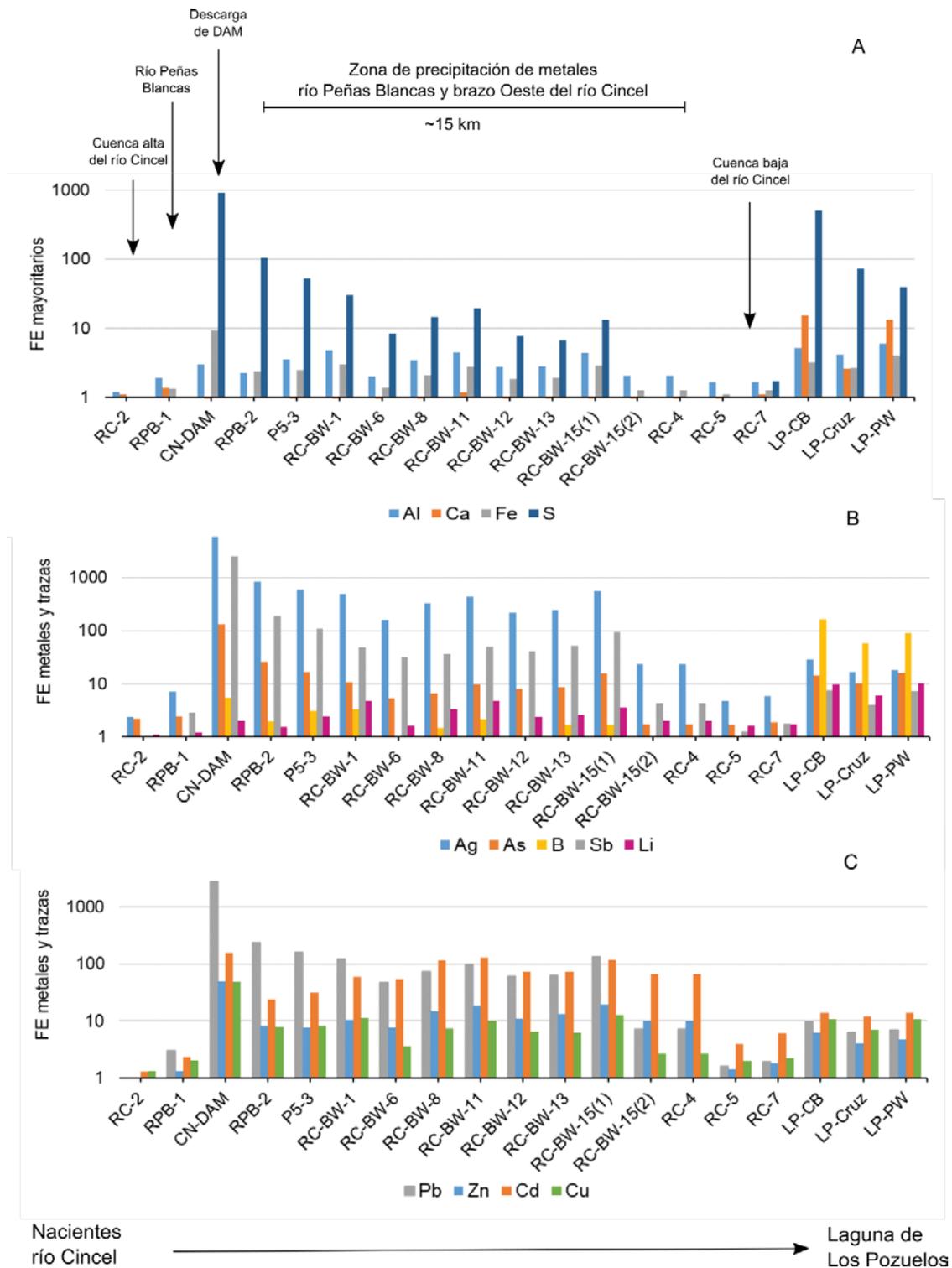
Se seleccionó la muestra RC-3 como nivel de base local ya que se trata de sedimentos del río Cincel en cuenca media que no reciben el aporte de drenaje ácido de minas y representan el nivel de base local para este sector de la cuenca sin influencia antropogénica. Comúnmente, para identificar las anomalías, se emplea la normalización geoquímica de los metales a un elemento conservativo, en este caso se utiliza el Ti y no el aluminio o el hierro ya que no serían conservativos en ambientes con presencia de DAM. El Ti ya ha sido utilizado en otros trabajos del Altiplano Boliviano para determinar anomalías de la actividad minera (Tapia et al., 2012). Valores de FE entre 0,5 y 1,5 indican que el metal proviene de fuentes naturales, mientras que valores mayores a 1,5 sugieren un origen antropogénico.

Los resultados numéricos del FE para cada muestra pueden verse en la Tabla 2 del Anexo 2. En la Figura 9 se grafican los elementos más representativos que tienen un origen asociado al DAM de Pan de Azúcar tales como S, Fe, Al, Ag, As, Sb, Pb, Zn, Cd y Cu. También se seleccionaron Ca, B y Li por ser elementos con altas concentraciones en las aguas y sedimentos pero que no necesariamente tienen un origen en el DAM.

Es notorio el enriquecimiento (valores > 1,5 y en algunos casos >1000) en S, Fe, Ag, Sb, Zn, Pb, As, Cd y Cu en la muestra de sedimentos que precipitan en el DAM (CN-DAM) y en las muestras del río Peñas Blancas y brazo Oeste del río Cincel hasta el punto RC-4. Tanto las muestras tomadas en el cauce actual como sobre la llanura de inundación se encuentran enriquecidas con altas concentraciones de metales. Estos metales tienen un origen en la paragénesis mineral de los sulfuros de la mina Pan de Azúcar y en los desechos mineros (Segal y Caffé et al., 1999; Murray et al., 2014). Producto de los procesos de oxidación de los sulfuros adquieren altas concentraciones en el DAM que luego descarga en el río Peñas Blancas (Murray et al., 2021) y migran hacia el brazo Oeste del río Cincel.



**Figura 8.** Concentraciones de elementos mayoritarios y metales en los sedimentos fluviales y lacustres muestreados en enero de 2020. A)- Elementos mayoritarios (concentraciones determinadas en %). B y C)- Metales y trazas (concentraciones determinadas en ppm o mg/Kg).



**Figura 9.** Factor de enriquecimiento en muestras de sedimentos fluviales y lacustres. A)- Elementos mayoritarios. B y C)- Metales y trazas.

En las muestras de cuenca baja del río Cincel (RC-5 y RC-7) el FE baja, especialmente para el azufre. Las anomalías en los metales Ag, Sb, Zn, Pb, As, Cd y Cu también disminuyen. La disminución de los metales en los sedimentos de los puntos RC-5 y RC-7 de cuenca baja podría estar favorecida por el aporte de los sedimentos limpios y frescos del brazo Este del río Cincel que no están afectados por la descarga del DAM (notar que la unión de los brazos del río Cincel se ubica justo aguas arriba del punto RC-5 y aguas abajo del punto RC-4, Figura 2). La mezcla actuaría como una suerte de atenuación natural de las anomalías metálicas.

En las muestras de la laguna vuelven a observarse enriquecimientos en S y en metales, este aumento puede estar asociado en parte al aporte de DAM, pero también a aportes del río Cincel y de los otros afluentes de la laguna que drenan la sierra de Rinconada. Dichos afluentes (ríos Chico, Guayatayoc y Santa Catalina) drenan zonas con anomalías metálicas asociadas a depósitos auríferos y de sulfuros metalíferos vetiformes (Rodríguez et al., 2001), poseen concentraciones de SO<sub>4</sub> y As (Murray et al., 2019) y también podrían aportar metales. El enriquecimiento de B y Li tendrían un origen diferente asociado a la meteorización de rocas volcánicas (Alonso et al., 1991). En tanto que el enriquecimiento de Ca está asociado a la precipitación de calcita.

Para poder diferenciar los tipos de aporte a la laguna, es decir el aporte antropogénico de la mina Pan de Azúcar, del aporte natural por la meteorización de sulfuros de la Sierra de Rinconada sería necesario realizar un estudio que determine la concentración de los metales en los sedimentos de la laguna en el pasado antes del inicio de las actividades humanas-mineras en la cuenca. Este análisis permitiría establecer el nivel de base de las concentraciones de metales para poder comparar con los niveles más actuales en donde podrían verse reflejadas la actividad de la mina y la descarga de DAM. Estudios de este tipo fueron realizados en el Altiplano Boliviano por Tapia et al. (2012 y 2019) en la laguna Cala Cala y en el lago Uru Uru. Allí se obtuvieron testigos de los sedimentos lacustres y a través de la caracterización química, sedimentológica y determinaciones de la edad del sedimento (dataciones) los investigadores pudieron establecer los niveles de base. En dicho trabajo es notorio cómo las variaciones en las concentraciones de determinados metales (Ag, Sb y Pb) describen la evolución de la minería del estaño en Bolivia, mientras que otros elementos (Mn, As y Cd) no son tan descriptivos ya que sufren variaciones que están controladas por la diagénesis temprana en los sedimentos lacustres. En estudios previos, Tapia y Audry (2013) indican que los procesos que controlan la movilidad de los metales en los sedimentos en las lagunas someras del Altiplano son muy complejos y la variabilidad climática juega un rol controlador muy importante.

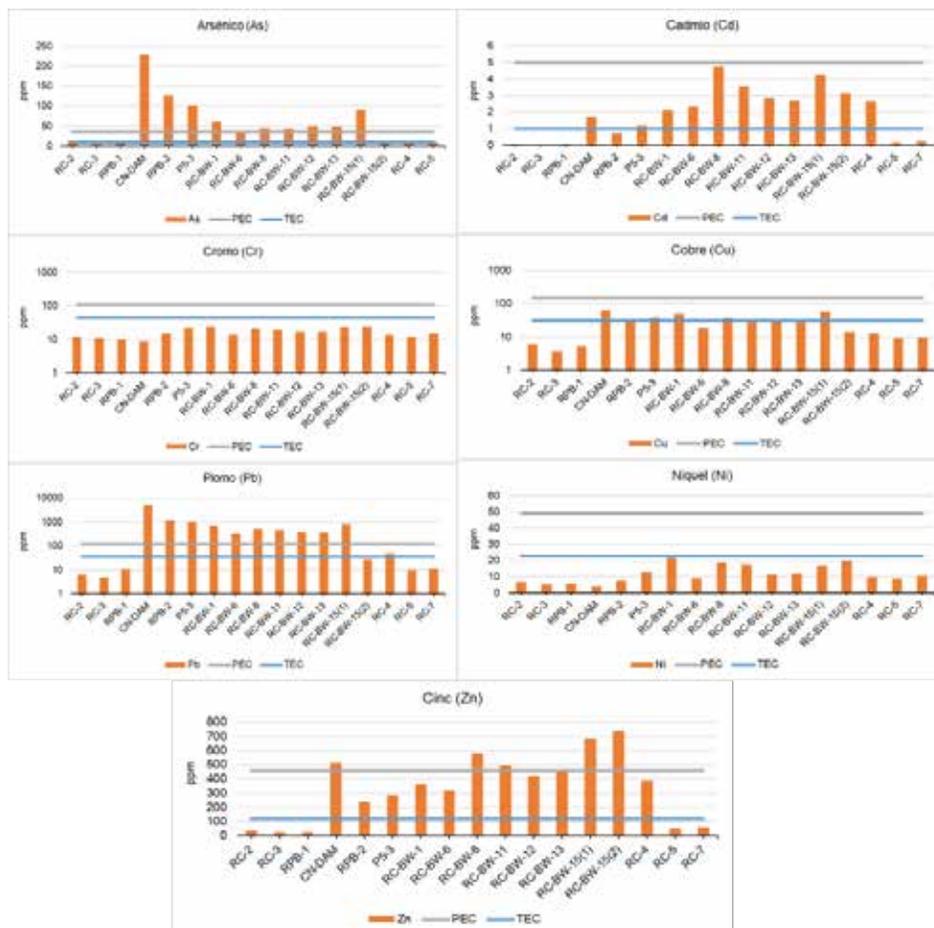
#### **4.1.2. Calidad de los sedimentos**

Debido a que la ley nacional 24.585 de la actividad minera no presenta valores guía para la calidad de los sedimentos fluviales, las concentraciones de metales pesados en los sedimentos fluviales se compararon con los valores guía de calidad de sedimentos para los ecosistemas de agua dulce de los Estados Unidos (MacDonald et al., 2000).

Se trata de los parámetros TEC (*Threshold Effect Concentration* o concentración para efecto umbral) y PEC (*Probable Effect Concentration* o concentración para efecto probable)

(Tabla 3, Anexo 2). Los valores TEC proporcionan una base precisa para predecir la ausencia de toxicidad en los sedimentos, es decir, indican la concentración del contaminante por debajo de la cual no se observan efectos nocivos para los organismos vivos en los sedimentos. Los valores PEC proporcionan una base precisa para predecir toxicidad de los sedimentos, es decir, indican las concentraciones por encima de las cuáles si se observan efectos nocivos para los organismos vivos en los sedimentos. Estos parámetros no tienen en cuenta el potencial de bioacumulación en los organismos acuáticos ni los riesgos asociados para las especies que los consumen (la fauna y los seres humanos) (MacDonald et al., 2000).

En la Figura 10 se graficaron las concentraciones de metales y metaloides en los sedimentos muestreados indicando los límites TEC y PEC para cada elemento. Se observa claramente que el grupo de muestras que tienen una fuerte influencia por la descarga de DAM (desde CN-DAM hasta RC-4) presentan concentraciones de As, Pb y Zn por encima de los límites TEC y PEC. Los valores de Cd y Cu superan los valores TEC, mientras que las concentraciones de Ni y Cr están por debajo de los límites.



**Figura 10.** Concentraciones de metales pesados en los sedimentos fluviales y los valores guía de calidad de sedimentos TEC y PEC para ecosistemas de agua dulce según MacDonald et al. (2000).

Por su parte, las muestras de la cuenca alta del río Cincel (RC-2), cuenca media sin influencia del DAM (RC-3), río Peñas Blancas aguas arriba de la mina Pan de Azúcar (RPB-1) y río Cincel cuenca baja (RC-5 y RC-7) no presentan concentraciones tóxicas de metales.

No se incluyen comparaciones para los sedimentos en la laguna ya que estos límites son específicamente para aguas dulces (MacDonald et al., 2000).

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se investigaron por primera vez en estación húmeda la geoquímica del agua y de sedimentos fluviales y lacustres del río Cincel y de la laguna de los Pozuelos.

Las aguas del río Cincel y en cuenca alta presentan anomalías naturales geogénicas en B, F, Li, Sr, As y en menor medida Zn y Cu dadas por la meteorización de rocas volcánicas y depósitos de sulfuros en la Sierra de Rinconada. Los sedimentos en estas muestras también presentan concentraciones de dichos elementos además de metales tales como Pb, Cd y Sb cuyas concentraciones no representan valores tóxicos y están asociados al mismo origen natural que en el agua.

Estas concentraciones de metales se ven exacerbadas y pasan a ser antropogénicas en los puntos de muestreo desde CN-DAM hasta RC-4 debido a la descarga de DAM. El DAM posee un pH bajo y elevadas concentraciones de metales que en orden de abundancia se distribuyen de la siguiente manera  $S > Fe > Al > Zn > Mn > As > Cu > F > Pb > Cd$ . Estas concentraciones están por encima de límites permitidos para distintos usos en las muestras de agua CN-DAM y P5-3. Los metales provenientes del DAM precipitan en los sedimentos fluviales y en la llanura de inundación del río Peñas Blancas y del brazo Oeste del río Cincel con valores que superan los límites TEC y PEC para el As, Pb, Zn y el límite TEC para Cd y Cu.

En los sedimentos fluviales de la cuenca baja del río Cincel se observa un descenso en las concentraciones de metales que está favorecido por el aporte de los sedimentos limpios y frescos del brazo Este del río Cincel que no están afectados por la descarga del DAM. El aporte del caudal líquido y sólido del brazo Este actúa como una suerte de atenuación natural de las anomalías metálicas.

En la laguna, el agua presenta una composición clorurada sódica comúnmente observada cuando se encuentra medianamente llena. El Na y el Cl se enriquecen en la solución como producto de la evolución geoquímica por la elevada evaporación y los valores de pH alcalinos que favorecen la precipitación de calcita y magnesita mientras que halita y yeso se mantienen en solución. Las concentraciones de metales y trazas son altas, especialmente para B, Sr, F, Li y As y se asocian a un origen geogénico principalmente, el As podría estar asociado también al DAM (Murray et al., 2019). En el sector sur de la laguna se observan concentraciones y conductividades mayores que en el sector norte que podrían estar relacionadas a un efecto de dilución por la descarga del río santa Catalina cuyo caudal era el doble que el río Cincel durante el muestreo.

En cuanto a los efectos de la descarga de DAM sobre la laguna, tanto los análisis de agua como de sedimentos indican que el origen y enriquecimiento de los metales están asociados a

fuentes naturales y probablemente también antropogénicas por el aporte del DAM. Tanto el río Cíncel como los otros afluentes que drenan la sierra de Rinconada (ríos Chico, Guayatayoc y Santa Catalina) aportan metales a la laguna a partir de la lixiviación natural de vetas mineralizadas con sulfuros. Para poder diferenciar el aporte antropogénico de la mina Pan de Azúcar del aporte natural, sería necesario el estudio de testigos de sedimentos de la laguna. La datación y análisis químicos de los sedimentos lacustres antiguos permitirá establecer el nivel de base geoquímico antes del inicio de la actividad minera y servirá de parámetro poder comparar con los niveles más actuales en donde probablemente se vea reflejado el impacto de la actividad de la mina y la descarga de DAM. Conocer este nivel de base será útil para la implementación de estrategias de remediación y prevención en la minería pasada, presente y futura en la cuenca.

*En base a los resultados de esta investigación se recomienda:*

- ✓ Mitigar la descarga de DAM de la mina en Pan de Azúcar sobre los cursos fluviales.
- ✓ En los sedimentos afectados con concentraciones anómalas de metales, especialmente sobre las llanuras de inundación, realizar un estudio de factibilidad para implementar estrategias de fitoremediación (con especies autóctonas) que puedan retener los metales evitando que los mismos se movilicen.
- ✓ Mantener la separación de los brazos del río Cíncel (si es necesaria una intervención en los cauces) para que el brazo Este del Cíncel continúe sin recibir la descarga de DAM y continúe generando un efecto de atenuación de las anomalías metálicas en la cuenca baja y en la laguna.
- ✓ Realizar estudios de caracterización de testigos de los sedimentos de la laguna a fin de establecer los niveles de base geoquímicos de la laguna y compararlos con los niveles más actuales en donde podría verse reflejado el impacto generado por la actividad minera.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se extiende agradecimiento a los colaboradores de la campaña de muestreo, entre ellos personal del Monumento Natural Laguna de Los Pozuelos y de la Fundación Humedales. Guardaparques Ariel Cazón, Nicolás Rodríguez Montuelle y María Eugenia Juez; Guardaparque de apoyo Cristian Mamaní, brigadistas Guillermo Arias y Walter Arias, Ingeniera en Recursos Naturales Carina Rodríguez y Lic. Cecilia Hegoburu.

Se agradece al Dr. Blaine McCleskey por los análisis de agua en el laboratorio del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

También se agradece a 2 revisores de este informe y a la Dra. Paula Pérez, de la Universidad de Vigo, Galicia, España, especialista en fitoremediación por sus aportes para el apartado de recomendaciones.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Alonso, R.N., Jordan, T.E., Tabbutt, K.T., Vandervoort, D.S., 1991. Giant evaporite belts of the Neogene central Andes. *Geology* 19, 401–404.
- Ball, J.W., Nordstrom, D.K., 1991. User's Manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 91–183, 193 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr91183>
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weisener, C.G., Paktunc, D., Gould, W.D., Johnson, D.B., 2014. In: *Treatise on Geochemistry* (Ed.), *The Geochemistry of Acid Mine Drainage*, 11th Ed, second ed. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0>
- Caffe, P., Coira, B., Chayle, W., Diaz, A., Martinez, M., Orosco, O., Perez, A., Perez, B., Ramirez, A., & Rosas, S., 2001. Hoja Geológica 2366-I, Mina Pirquitas. Provincia de Jujuy. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín. Buenos Aires. 269 p.
- Dold, B., 2017. Acid rock drainage prediction: a critical review. *J. Geochem. Explor.* 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Drever, J.I., 1997. *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*. 3rd ed. Prentice-Hall, New York.
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B. 2003. Trace elements in river waters. In: Drever, J.I. (Ed.), *Surface and Ground Water, Weathering, and Soils*, vol. 5. Holland, H.D., Turekian, K.K. (Exe. Eds.), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier- Pergamon, Amsterdam, pp. 225–272 (Capítulo 9).
- Igarzábal, A.P. 1978. La Laguna de Pozuelos y su Ambiente Salino. *Acta Geológica Lilloana* 15, 79–103.
- Igarzábal, A. P. 1991. Evaporitas cuaternarias de la Puna Argentina. In: Pueyo, J.J. (Ed.), *Génesis de formaciones evaporíticas: Modelos Andinos e Ibéricos*. 2. Universitat de Barcelona Pub, Barcelona, pp. 333–373.
- Jones, B.F., Deocampo, D.M. 2003. Geochemistry of Saline Lakes. In: Drever, J.I. (Ed.), *Surface and Ground Water, Weathering, and Soils*, vol. 5. Holland, H.D., Turekian, K.K. (Exe. Eds.), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier- Pergamon, Amsterdam, pp. 393-424 (Capítulo 13) <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05083-0>
- Kharaka, Y.K., Hanor, J.S., 2003. Deep fluids in the continents: I. Sedimentary basins. In: Drever, J.I. (Ed.), *Surface and Ground Water, Weathering, and Soils*, vol. 5. Holland, H.D., Turekian, K.K. (Exe. Eds.), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier- Pergamon, Amsterdam, pp. 499–540 (Capítulo 16).
- Knight, R.D., Kjarsgaard, B.A., Plourde, A.P., and Moroz, M., 2013. Portable XRF spectrometry of standard reference materials with respect to precision, accuracy, instrument drift, dwell time optimization, and calibration; Geological Survey of Canada, Open File 7358. doi:10.4095/292677
- Maggi, A.E., Navone, S.M., 2009. Consecuencias de El Niño 2002 sobre las lagunas de Trenque Lauquén y Pozuelos. In: Fernández Reyes, L., Volpedo, A.V., Pérez Carrera, A. (Eds.), *Estrategias Integradas de Mitigación y Adaptación a Cambios Globales*, Red CYTED 406RT0285 Efecto de los cambios globales sobre los humedales de Iberoamérica. Buenos Aires, pp. 185–191.

- MacDonald DD, Ingersoll CG, Berger TA. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39:20–31.
- McCleskey, R.B., Ball, J.W., Nordstrom, D.K., 2003. Metal Interferences and Their Removal Prior to the Determination of As(T) and As(III) in Acid Mine Waters by Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4117. 14 p. <http://pubs.usgs.gov/wri/wri03-4117>
- McGlue, M.M., Ellis, G.S., Cohen, A.S., Swarzenski, P.W., 2012. Playa-lake sedimentation and organic matter accumulation in an Andean piggyback basin: the recent record from the Cuenca de Pozuelos, North-west Argentina. *Sedimentology* 59, 1237–1256. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01304.x>.
- McGlue, M.M., Cohen, A.S., Ellis, G.S., Kowler, A.L., 2013. Late Quaternary stratigraphy, sedimentology and geochemistry of an under filled lake basin in the Puna plateau (northwest Argentina). *Basin Res.* 25, 1–21. <https://doi.org/10.1111/bre.12025>
- Murray, J., Nordstrom, D. K., Dold, B., Romero Orué, M., & Kirschbaum, A., 2019. Origin and geochemistry of arsenic in surface and groundwater of Los Pozuelos Basin, Puna region Argentina. *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134085>
- Nordstrom, D.K., Alpers, C.N., 1999. Geochemistry of acid mine waters. In: Plumlee, G. S., Logsdon, M.J. (Eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*, 6A. *Reviews in Economic Geology*, Littleton, CO, pp. 133–160. Society of Economic Geologist.
- Nordstrom, D.K., Blowes, D.W., Ptacek, C.J., 2015. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Appl. Geochem.* 57, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>
- Rodríguez, G.A., De Azevedo Jr., F.I., Coira, B., Brodie, C., 2001. Mineralizaciones auríferas en sedimentitas ordovícicas de la sierra de Rinconada (Jujuy-Argentina): implicancias para la exploración minera. *Revista geológica de Chile* 28, 47–66. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082001000100003>.
- Tapia, J., Audry, S., Townley, B., Duprey, J.L., 2012. Geochemical background, baseline and origin of contaminants from sediments in the mining-impacted Altiplano and Eastern Cordillera of Oruro, Bolivia. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 12, 3–20. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/10-RA-049>
- Tapia, J., Audry, S., 2013. Control of early diagenesis processes on trace metal (Cu, Zn, Cd, Pb and U) and metalloid (As, Sb) behaviors in mining- and smelting-impacted lacustrine environments of the Bolivian Altiplano. *Appl. Geochem.* 31, 60–78. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.12.006>.
- Tapia, J., Audry, S., van Beek, P. 2019. Natural and anthropogenic controls on particulate metal(loid) deposition in Bolivian highland sediments, Lake Uru Uru (Bolivia). *The Holocene*, 30, 428-440. <https://doi.org/10.1177/0959683619887425>
- To, T.B., Nordstrom, D.K., Cunningham, K.M., Ball, J.W., McCleskey, R.B., 1999. New method for the direct determination of dissolved Fe(III) concentration in acid mine waters. *Environment Science & Technology* 33, 807–813. <https://doi.org/10.1021/es980684z>

## Anexo 1. Geoquímica de aguas

**Tabla 1.** Muestras de agua *con análisis químicos*. Ubicación y parámetros físico químicos determinados a campo.

		Coordenadas		Altura	Fecha muestreo	Caudal	prof	pH	SDT	Cond.	T	Oxígeno disuelto	Eh
Muestra	Sitio de muestreo	S	W	msnm		m3/S	cm		ppm	( $\mu$ S/cm)	°C	mg/L	mV
RC-2	Cabecera del río Cincel	22 40 43.1	66 7 14.5	3683	20-01-2020	2.66	-	8.15	83	124.9	24.4	6.5	261
RC-3	Brazo Este río Cincel, intersección R71	22 31 44.4	65 58 47.8	3645	20-01-2020	1.29	-	8.18	~64	126.8	22.4	6.2	260
RPB-1	Río Peñas Blancas, aguas arriba mina Pan de Azúcar	22 35 31.2	66 3 54.6	3707	27-01-2020	0	-	6.49	~177	355	21.4	6.7	260
CN-DAM	Drenaje de mina Pan de Azúcar	22 35 30.86	66 3 29.7	3705	27-01-2020	n.d.	-	2.14	~3300	7790	17.2	6.8	467
P5-3	Río Peñas Blancas, planicie de inundación aguas abajo de Pan de Azúcar	22 33 49.5	66 0 56.6	3691	21-01-2020	0	-	4.04	216	437	18.8	6.8	290
RC-5	Río Cincel, altura seccional Parques Nacionales	22 28 24.18	65 59 40.22	n.d.	28-01-2020	0.35	-	9.07	107	205	18.9	7.4	195
RC-7	Río Cincel, desembocadura laguna	22 24 46.2	65 58 42.7	3674	28-01-2020	n.d.	-	8.7	118	213	25.6	11.1	155
LP-CB	Laguna de los Pozuelos, Casa del Barco	22 24 37.3	66 00 56.8	3676	22-01-2020	-	8.5	8.57	~8300	16720	24.6	9.5	45
LP-Cruz	Laguna de los Pozuelos, borde SE, familia Cruz	22 23 54.9	65 59 08.0	3638	29-01-2020	-	9.0	8.75	~8500	17150	19.7	6.5	180
LP-PW	Laguna de los Pozuelos, Península oeste	22 17 54.3	66 00 15.5	3677	22-01-2020	-	5.0	8.62	~1050	2120	13.9	7.9	138

**Tabla 2.** Muestras de agua *sin análisis químicos*. Ubicación y parámetros físico químicos determinados a campo.

		Coordenadas		Altura	Fecha muestreo	Caudal	prof	pH	SDT	Cond.	T	Oxígeno disuelto	Eh
Muestra	Sitio de muestreo	S	W	msnm		m3/S	cm		ppm	( $\mu$ S/cm)	°C	mg/L	mV
Río Chico	Río Chico	22 25 43.3	66 01 53.8	-	22-01-2020	0.02	-	6.28	n.d.	312	18.8	7.6	180
Río Santa Catalina	Río Santa catalina, desembocadura laguna	22 17 45.7	65 59 17.0	-	22-01-2020	4.75	-	7.82	98	160.4	17.8	6.8	252
RPB-2	Río Pañas Blancas, aguas abajo de la descarga de drenaje de mina, agua estancada de la última lluvia o crecida	22 35 24.0	66 3 12.73	3686	27-01-2020	0	-	6.08	n.d.	268	22.5	6.3	278
RC-BW-1	Río Cincel Brazo W, intersección entre el camino R71 y el río Peñas Blancas	22 33 40	66 00 46.6	-	23-01-2020	0	-	5.86	231	413	17.7	6.4	255
RC-BW-8	Río Cincel Brazo W, agua estancada de la última lluvia o crecida	22 32 53.3	66 00 42.2	-	23-01-2020	0	-	6.4	86	149.7	23.6	7.2	287
RC-BW-15	Río Cincel Brazo W, ciénego frente familia de Justino	22 31 41.5	66 00 25	-	24-01-2020	0	-	6.79	144	278	25	n.d.	n.d.
RC-4	Río Cincel Brazo W, agua estancada de la última lluvia o crecida	22 30 56.1	66 00 39.8	-	23-01-2020	0	-	6.81	138	258	24	7.5	257

**Tabla 3.** Composición de iones mayoritarios de muestras de agua.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	HCO3	Tipo de agua	ERROR
Muestra	mg/L	mg/L HCO3		%						
RC-2	8.93	2.2	12	2.79	5.5	15	0.25	43.5	Na-HCO3	1.1
RC-3	10.2	2.22	11.2	3.08	5.3	14.9	0.74	45.2	Na-HCO3	0.4
RPB-1	24	5.08	31.6	5.3	38.2	32.4	0.07	87.9	Na-HCO3	-1.1
CN-DAM	153	75	20.8	6.68	9.7	8310	6.3	---	Fe-Al-SO4	-3.6
P5-3	36.6	6.65	10.6	5.48	7.3	158	<0.05	---	Ca-SO4	0.2
RC-5	16.7	3.41	17.7	4.04	9.3	23.4	0.47	73.8	Na-HCO3	-0.2
RC-7	17.5	3.65	18	3.98	10.1	24.2	<0.05	77	Na-HCO3	0.2
LP-CB	457	136	2830	249	4320	2090	<0.05	275	Na-Cl	-2
LP-Cruz	519	158	3190	303	4970	2420	<0.05	324	Na-Cl	-2.8
LP-PW	75.8	14.2	320	38.4	455	335	<0.05	52.8	Na-Cl	-2

**Tabla 4.** Índices de Saturación (IS) para minerales que precipitan o se disuelven a partir de la solución. Calculados con el programa WATEQ.4F (Ball and Nordstrom (1991)) y PHREEQC.V3 usando la base de datos WATEQ.4F.

Muestra	Anglesita	Calcita	Goethita	Hidróxido de aluminio amorfo	Halita	Jarosita K	Magnesita	Silica gel	Yeso	Ferrihidrita	Schwertmannita	Hidróxido de hierro amorfo
	(PbSO <sub>4</sub> )	(CaCO <sub>3</sub> )	Fe(OH)O	Al(OH) <sub>3</sub> (a)	NaCl	(KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>6</sub> )	(MgCO <sub>3</sub> )	(SiO <sub>2</sub> )	(CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O)	(5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O)	Fe <sub>8</sub> O <sub>8</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>1.26</sub> (OH) <sub>5.48</sub>	Fe(OH) <sub>3</sub> (a)
RC-2	n.c.	-0.6	n.c.	-1.4	-8.7	n.c.	-1.5	-0.4	-3.1	n.c.	n.c.	n.c.
RC-3	n.c.	-0.6	n.c.	-1.0	-8.7	n.c.	-1.5	-0.4	-3.0	n.c.	n.c.	n.c.
RPB-1	n.c.	-1.6	n.c.	-0.2	-7.4	n.c.	-2.6	-0.5	-2.4	n.c.	n.c.	n.c.
CN-DAM	-0.2	n.c.	3.5	-8.3	-8.4	3.9	n.c.	-0.9	-0.6	-2.1	-4.0	-2.1
P5-3	-2.5	n.c.	3.8	-4.1	-8.6	-2.7	n.c.	-0.5	-1.6	-1.9	-8.4	-1.9
RC-5	n.c.	0.6	n.c.	-3.0	-8.3	n.c.	-0.4	-0.3	-2.7	n.c.	n.c.	n.c.
RC-7	n.c.	0.4	n.c.	-2.8	-8.2	n.c.	-0.5	-0.3	-2.6	n.c.	n.c.	n.c.
LP-CB	n.c.	1.4	n.c.	-2.6	-3.6	n.c.	0.7	-1.7	-0.3	n.c.	n.c.	n.c.
LP-Cruz	n.c.	1.6	n.c.	-2.8	-3.5	n.c.	0.8	-0.9	-0.2	n.c.	n.c.	n.c.
LP-PW	n.c.	0.3	n.c.	-1.6	-5.4	n.c.	-0.8	-1.2	-1.2	n.c.	n.c.	n.c.

IS = 0, mineral en equilibrio; IS > 0, mineral que precipita; IS < 0, mineral que se disuelve. n.c.= IS no calculado por el programa.

**Tabla 5.** Composición de metales y elementos minoritarios en las muestras de agua.

	Fe(T)	Fe(II)	SiO2	B	P	Al	F	Li	Sr	Ba	Mn	Mo	Cu	Zn	Cd	Cr	Co	Pb
Muestra	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
RC-2	0.066	0.066	22.7	0.594	0.08	0.097	0.1	0.0164	0.0788	0.0159	0.0018	< 0.005	0.001	0.007	< 0.003	< 0.001	< 0.003	< 0.01
RC-3	0.112	0.112	20.8	0.547	0.12	0.185	0.11	0.0132	0.0811	0.019	0.0038	< 0.005	0.002	0.0079	< 0.003	< 0.001	< 0.003	< 0.01
RPB-1	0.104	0.104	16.7	2.03	0.22	0.104	0.21	0.0145	0.192	0.0616	0.0169	< 0.005	0.004	0.0236	< 0.002	< 0.001	< 0.003	< 0.01
CN-DAM	2195	513	5.55	0.707	5.19	506	3.02	0.634	0.531	0.0097	47.6	< 0.05	4.87	221	1.23	0.277	0.658	1.87
P5-3	2.49	2.48	14.6	0.568	< 0.04	1.7	0.22	0.0288	0.242	0.083	1.94	< 0.005	0.031	2.53	0.021	0.0019	0.021	0.02
RC-5	0.013	0.013	30.5	0.873	0.05	0.011	0.16	0.017	0.13	0.0262	0.0027	< 0.005	0.0012	0.0122	< 0.002	< 0.001	< 0.003	< 0.01
RC-7	0.039	0.039	30.3	0.872	< 0.04	0.013	0.16	0.017	0.138	0.0281	0.0025	< 0.005	0.0014	0.0136	< 0.002	0.002	< 0.003	< 0.01
LP-CB	0.004	0.004	1.28	64.1	< 0.2	0.017	0.68	0.635	8.58	0.127	0.156	0.021	0.002	0.0163	< 0.002	0.002	< 0.003	< 0.01
LP-Cruz	0.003	0.003	7.2	68.8	< 0.2	0.012	0.75	0.792	9.31	0.119	0.301	0.036	0.002	0.0127	< 0.002	0.002	< 0.003	< 0.01
LP-PW	0.019	0.019	2.98	10.4	< 0.04	0.057	0.3	0.102	1.11	0.0898	0.0025	0.01	0.008	0.0127	< 0.002	0.002	< 0.003	< 0.01

**Tabla 5.** (continuación).

	Ni	Rb	Br	V	W	Sb	U	Be	As (T)	As(T)	As(III)	As (V)
Muestra	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L
RC-2	< 0.003	0.003	<0.01	0.003	< 0.01	< 0.05	< 0.004	< 0.0005	0.01	9.1	<0.6	9.1
RC-3	< 0.003	0.002	<0.01	0.005	< 0.01	< 0.05	< 0.004	< 0.0005	0.01	9.7	0.7	9.0
RPB-1	0.003	0.002	0.14	0.008	< 0.01	< 0.05	0.007	< 0.0005	0.02	23.5	0.9	22.6
CN-DAM	0.626	0.162	0.37	0.565	2.5	< 0.1	0.603	0.0372	11.50	11500	542	10957.6
P5-3	0.014	0.005	0.01	< 0.001	0.03	< 0.05	0.005	0.0016	0.002	2.1	1.1	1.0
RC-5	< 0.003	0.003	0.04	0.008	< 0.01	< 0.05	< 0.005	< 0.0005	0.02	18.0	<0.6	18.0
RC-7	< 0.003	0.002	0.04	0.008	< 0.01	< 0.05	< 0.005	< 0.0005	0.02	18.7	<0.6	18.7
LP-CB	< 0.003	0.032	6.93	0.002	< 0.01	< 0.05	0.009	< 0.0005	0.15	153	<0.6	153.0
LP-Cruz	0.003	0.036	8.3	0.006	< 0.01	< 0.05	0.026	< 0.0005	0.18	180	14.5	165.4
LP-PW	< 0.003	0.005	0.59	0.007	< 0.01	< 0.05	< 0.004	< 0.0005	0.04	38.6	2.1	36.4

## ANEXO 2. Geoquímica de sedimentos fluviales y lacustres

**Tabla 1.** Sitios de muestreo de sedimentos fluviales y lacustres.

Muestra	Coordenadas		Lugar	Fecha	Con muestra de agua
	S	W			
RC-2	22 40 43.1	66 7 14.5	Río Cincel cuenca alta	20-01-2020	si
RC-3	22 31 44.4	65 58 47.8	Río Cincel Ruta 71	20-01-2020	si
RPB-1	22 35 31.2	66 3 54.6	Río Cincel sedimento fluvial actual en el cauce aguas arriba del DAM color rojizo por erosión del Cerro de Pan de Azúcar pareciera	27-01-2020	si
CN-DAM	22 35 30.86	66 3 29.7	Precipitados de DAM color amarillento típico de jarosita	27-01-2020	si
RPB-2	22 35 24	66 3 12.73	Río Cincel sedimento fluvial actual en el cauce aguas abajo del DAM, color amarillento por el DAM pareciera	27-01-2020	no
P5-3	22 33 49.5	66 00 56.6	Ciénego atrás de Cerro León, llanura de inundación	21-01-2020	si
RC-BW-1	22 33 40.0	66 0 46.6	Río Cincel sedimento fluvial actual en el cauce	23-01-2020	no
RC-BW-6	22 33 12.4	66 00 49.3	Río Cincel llanura de inundación	23-01-2020	no
RC-BW-8	22 32 53.3	66 0 42.2	Río Cincel sedimento fluvial actual en el cauce	23-01-2020	no
RC-BW-11	22 32 16.9	66 00 38.2	Río Cincel sedimento fluvial actual en el cauce	23-01-2020	no
RC-BW-12	22 32 06.2	66 00 38.7	Río Cincel borde cauce-llanura de inundación	23-01-2020	no
RC-BW-13	22 31 57.3	66 00 31.5	Río Cincel llanura de inundación	24-01-2020	no
RC-BW-15(1)	22 31 41.5	66 00 25	Sedimentos ciénego primeros 14cm del perfil	24-01-2020	no
RC-BW-15(2)	22 31 41.5	66 00 25	Sedimentos ciénego segundos 46 cm del perfil	24-01-2020	no
RC-4	22 30 56.1	66 00 39.8	Río Cincel sedimento fluvial actual en el cauce	23-01-2020	no
RC-5	22 28 24.18	65 59 40.22	Río Cincel seccional	28-01-2020	si
RC-7	22 24 46.2	65 58 42.7	Río Cincel zona desembocadura	28-01-2020	si
LP-CB	22 24 37.3	66 00 56.8	Laguna Casa del Barco	22-01-200	si
LP-Cruz	22 23 54.9	65 59 08.0	Sedimentos lagunares entrando por lo de Cruz	29-01-2020	si
LP-PW	22 17 54.3	66 00 15.5	Laguna Península Oeste	22-01-2020	si

**TABLA 2.** Factor de enriquecimiento para las muestras de sedimentos en base a la siguiente ecuación  $FE = (Me/Ti)_{muestra}/(Me/Ti)_{background (RC-3)}$  en la que la muestra RC-3 es considerada como nivel de base o *background*, el titanio como elemento conservativo y Me la concentración del metal tanto en la muestra como en el *background*.

Muestra	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	S	Ti	Ag	As	Au	B	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	Hg	
RC-2	1.2	1.1	1.0	1.2	1.1	1.2	n.d	1.0	2.3	2.2	n.d	n.d	1.8	1.4	1.2	1.3	0.6	1.1	0.9	1.1	1.3	1.1	0.9	0.7	n.d	
RC-3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	n.d	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	n.d
RPB-1	1.9	1.4	1.4	1.5	1.3	2.1	n.d	1.0	7.1	2.4	n.d	n.d	2.5	1.6	1.8	2.4	0.7	1.7	1.3	2.4	2.0	1.3	0.9	1.8	n.d	
CN-DAM	3.0	0.9	9.3	7.7	1.2	11.1	916.7	1.0	9972.2	131.9	n.d	5.6	8.3	2.9	84.3	157.4	0.9	1.7	2.3	10.2	48.9	2.6	2.5	1.7	n.d	
RPB-2	2.2	1.0	2.4	2.2	1.6	3.4	103.2	1.0	838.6	25.7	n.d	1.9	5.6	1.7	6.8	24.4	0.5	1.5	1.3	3.2	7.9	1.5	1.1	1.5	n.d	
P5-3	3.6	0.8	2.5	3.0	2.4	2.0	52.1	1.0	589.7	16.5	n.d	3.2	6.9	2.7	6.2	31.3	0.7	1.9	1.6	2.8	8.3	2.1	0.9	1.9	n.d	
RC-BW-1	4.8	0.7	3.0	2.6	2.9	1.7	30.3	1.0	497.2	10.8	n.d	3.4	3.2	4.7	5.6	59.3	0.9	3.1	1.8	3.1	11.3	2.8	1.0	0.8	n.d	
RC-BW-6	2.0	0.7	1.4	1.7	1.5	1.8	8.5	1.0	158.5	5.4	n.d	n.d	2.3	1.7	1.9	54.7	0.5	1.1	0.9	1.8	3.6	1.2	0.7	1.1	n.d	
RC-BW-8	3.4	0.9	2.1	2.4	2.5	1.1	14.7	1.0	333.8	6.7	n.d	1.5	2.9	3.4	3.6	116.4	0.8	2.5	1.4	2.6	7.4	2.0	0.9	1.0	n.d	
RC-BW-11	4.5	1.2	2.7	2.6	3.0	1.6	19.6	1.0	437.0	9.8	n.d	2.2	3.3	4.5	4.8	129.3	1.0	3.1	1.9	3.5	10.0	2.6	1.1	1.1	n.d	
RC-BW-12	2.8	0.7	1.8	2.0	1.9	1.5	7.7	1.0	219.6	8.0	n.d	n.d	2.9	2.6	2.9	73.0	0.6	1.5	1.2	2.3	6.5	1.6	0.9	1.2	n.d	
RC-BW-13	2.8	0.9	1.9	2.0	2.2	1.3	6.7	1.0	245.2	8.6	n.d	1.7	2.7	2.8	3.3	74.7	0.8	2.0	1.3	2.4	6.2	1.8	0.9	1.3	n.d	
RC-BW-15(1)	4.3	0.9	2.8	2.9	3.0	1.3	13.3	1.0	570.0	15.7	n.d	1.7	4.2	4.4	5.4	119.4	0.9	2.4	1.7	3.2	12.8	2.6	1.0	1.8	n.d	
RC-BW-15(2)	2.0	0.9	1.2	1.9	1.8	1.1	n.d	1.0	23.7	1.7	n.d	n.d	1.7	2.3	1.6	67.3	0.6	1.7	1.0	2.0	2.7	1.4	0.8	0.8	n.d	
RC-4	2.0	0.9	1.2	1.9	1.8	1.1	n.d	1.0	23.7	1.7	n.d	n.d	1.7	2.3	1.6	67.3	0.6	1.7	1.0	2.0	2.7	1.4	0.8	0.8	n.d	
RC-5	1.7	0.9	1.1	1.6	1.6	1.2	n.d	1.0	4.8	1.7	n.d	n.d	2.2	1.9	1.5	4.0	0.5	1.5	0.9	1.7	2.0	1.3	0.8	0.7	n.d	
RC-7	1.7	1.1	1.2	1.6	1.7	1.7	1.7	1.0	6.0	1.9	n.d	n.d	2.1	1.9	1.5	6.0	0.6	1.7	1.2	1.7	2.3	1.3	0.9	0.9	n.d	
LP-CB	5.2	15.5	3.2	7.4	6.5	71.2	505.9	1.0	28.0	14.4	n.d	165.3	4.8	3.6	5.4	14.0	0.8	4.8	2.1	5.3	10.8	2.5	1.3	0.9	n.d	
LP-Cruz	4.2	2.6	2.7	5.0	4.6	37.5	73.0	1.0	16.8	10.4	n.d	59.2	3.7	4.5	4.5	12.2	0.9	3.9	1.9	2.6	7.1	2.6	1.2	0.8	n.d	
LP-PW	6.0	13.3	4.0	7.4	6.9	31.6	39.5	1.0	18.4	16.3	n.d	89.5	8.9	3.9	5.5	14.0	1.2	6.4	2.6	4.8	10.6	3.0	1.6	1.6	n.d	

**Tabla 2.** Continuación.

Muestra	In	La	Li	Mn	Mo	Nb	Ni	P	Pb	Rb	Re	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Te	Th	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr
RC-2	1.2	0.5	1.1	1.3	1.3	1.2	1.0	0.9	1.0	1.2	n.d	1.0	1.2	n.d	1.1	1.2	n.d	1.6	0.8	1.3	1.1	1.0	1.1	0.9	1.0	0.9
RC-3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	n.d	1.0	1.0	n.d	1.0	1.0	n.d	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
RPB-1	1.7	0.7	1.2	2.2	1.6	0.9	1.5	0.5	3.0	1.8	n.d	2.8	1.8	n.d	0.7	2.4	n.d	1.4	1.1	2.5	0.9	1.1	0.8	0.8	1.3	2.4
CN-DAM	102.8	0.9	2.0	2.8	20.6	2.0	2.0	1.3	2805.6	5.5	n.d	2531.7	2.2	n.d	85.5	14.0	n.d	13.9	1.4	537.0	1.2	1.5	14.5	0.7	49.1	2.6
RPB-2	13.8	0.5	1.5	2.1	4.2	1.4	1.4	0.5	235.7	2.1	n.d	194.5	2.1	n.d	7.0	3.4	n.d	2.9	1.0	38.8	0.9	1.2	1.6	0.6	8.1	2.0
P5-3	11.3	0.7	2.5	2.1	3.0	1.3	1.9	0.5	162.6	2.8	n.d	110.5	3.4	n.d	5.3	3.2	n.d	2.4	1.5	27.0	1.4	1.3	1.0	1.0	7.7	2.7
RC-BW-1	15.7	0.9	4.7	3.2	4.3	1.9	3.4	0.6	124.0	2.7	n.d	48.0	3.5	n.d	3.7	2.6	n.d	4.2	1.8	19.2	3.5	1.3	1.4	1.2	10.5	1.4
RC-BW-6	4.9	0.5	1.6	0.9	1.6	1.3	1.2	0.4	47.4	1.7	n.d	30.7	1.7	n.d	1.7	1.9	n.d	1.4	1.0	9.6	1.2	0.8	0.8	0.6	7.7	1.5
RC-BW-8	8.6	0.7	3.4	2.4	3.0	1.8	2.6	0.5	73.8	2.4	n.d	36.8	2.6	n.d	2.7	2.5	n.d	3.7	1.5	13.3	2.6	1.0	1.0	0.9	14.7	1.5
RC-BW-11	12.4	0.9	4.7	3.4	3.9	2.1	3.5	0.7	100.9	2.7	n.d	49.5	3.3	n.d	3.4	3.1	n.d	4.3	1.8	17.4	3.2	1.2	1.5	1.2	18.6	1.7
RC-BW-12	7.7	0.6	2.3	1.5	2.3	1.7	1.6	0.4	60.8	2.0	n.d	41.3	2.2	n.d	2.2	2.1	n.d	2.3	1.2	10.1	1.7	0.9	1.0	0.9	11.2	1.7
RC-BW-13	7.2	0.8	2.6	2.1	2.2	1.7	1.9	0.6	62.7	2.0	n.d	51.8	2.4	n.d	2.7	2.3	n.d	1.7	1.4	11.3	1.6	1.1	1.1	1.0	13.1	1.8
RC-BW-15(1)	15.1	0.9	3.6	2.1	4.1	1.8	2.7	0.6	136.5	2.8	n.d	94.3	3.7	n.d	4.6	3.0	n.d	4.2	1.8	20.3	2.8	1.3	1.2	1.3	19.6	2.4
RC-BW-15(2)	2.3	0.6	2.0	2.3	0.9	1.6	1.4	0.4	7.3	1.8	n.d	4.3	1.8	n.d	1.2	1.8	n.d	0.8	1.0	3.3	1.1	0.8	0.8	0.7	10.2	1.1
RC-4	2.3	0.6	2.0	2.3	0.9	1.6	1.4	0.4	7.3	1.8	n.d	4.3	1.8	n.d	1.2	1.8	n.d	0.8	1.0	3.3	1.1	0.8	0.8	0.7	10.2	1.1
RC-5	1.6	0.5	1.6	1.5	1.3	1.4	1.3	0.5	1.6	1.6	n.d	1.3	1.5	n.d	1.0	1.8	n.d	1.6	1.0	1.9	1.4	0.8	0.9	0.7	1.4	1.1
RC-7	1.6	0.6	1.7	1.9	1.7	1.4	1.7	0.6	1.9	1.6	n.d	1.8	1.6	n.d	1.0	2.0	n.d	1.7	1.1	2.0	1.3	0.9	0.9	0.8	1.8	1.1
LP-CB	5.0	0.8	9.8	7.3	22.5	2.2	5.3	0.8	9.7	2.5	n.d	7.6	3.5	n.d	1.0	37.5	n.d	3.8	1.9	4.0	8.1	1.5	1.7	1.1	6.2	1.4
LP-Cruz	3.2	0.9	6.0	5.1	7.8	2.2	4.1	0.6	6.3	2.6	n.d	4.0	3.2	n.d	1.4	8.4	n.d	3.0	1.8	3.6	3.8	1.3	1.4	1.1	4.0	1.2
LP-PW	4.5	1.2	10.3	6.7	3.9	1.3	7.2	0.9	6.9	2.7	n.d	7.4	4.6	n.d	0.9	21.5	n.d	6.6	3.0	4.1	2.9	1.7	1.7	1.3	4.7	2.9

**Tabla 3.** Valores guía para la calidad de los sedimentos fluviales, para los ecosistemas de agua dulce de los Estados Unidos (MacDonald et al., 2000).

	TEC	PEC
	ppm	ppm
As	9.79	36
Cd	0.99	4.98
Cr	43.4	111
Cu	31.6	149
Pb	35.8	128
Hg	0.18	1.06
Ni	22.7	48.6
Zn	121	459

### ANEXO 3. Fotos de sitios representativos del muestreo



**Figura 1.** A)- Río Cincel cuenca alta (RC-2). B)- Drenaje ácido de minas en la descarga al río Peñas Blancas. C)-Puntop de muestreo P5-3, ciénego en zona de unión río Peñas Blancas y brazo Oeste del río Cincel. D)- Río Santa Catalina zona de desembuchadora de la laguna. E)- Laguna de los Pozuelos zona casa del barco (LP-CB).



**Figura 2.** Fotos del cauce en brazo Oeste del río Cincel en el sitio RC-BW-12. A)-borde entre el cauce y la llanura de inundación donde se tomó la muestra. B) detalle de los sedimentos con precipitados de óxidos de hierro donde co-precipitan metales.