

**Testigos de perforación del Bajo de la Alumbraera, provincia de Catamarca, Argentina,
como patrimonio geológico *ex situ***

*Guillermo F. Aceñolaza¹, Matías F. García¹, Sergio M. Nieva¹, *Laura I. Bellos¹, Luis R. Horta¹, Enrique Lazarte¹*

¹Instituto Superior de Correlación Geológica (CONICET-UNT), Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Miguel Lillo 205, CP. 4000, Tucumán, Argentina.

gfacenolaza@csnat.unt.edu.ar, matiasfgarcia@csnat.unt.edu.ar, smnieva@csnat.unt.edu.ar,
laubel@csnat.unt.edu.ar, jelazar@csnat.unt.edu.ar, hluisth@csnat.unt.edu.ar

*Autor de correspondencia

Resumen. Las muestras de testigos de perforación en roca de áreas mineralizadas son, entre otras cosas, la base del análisis preliminar para definir la viabilidad técnica y económica de una posible explotación minera. Estas, particularmente en contextos donde los trabajos de explotación avanzaron hasta el punto en que las rocas perforadas han desaparecido, constituyen registros geológicos únicos desde el punto de vista científico e histórico de un determinado yacimiento y cobran un valor relevante como patrimonio geológico mueble. En este trabajo se analiza la importancia como patrimonio geológico *ex situ* de los testigos de perforación de las unidades de roca correspondientes al Complejo Volcánico Farallón Negro (9,0-6,8 Ma) y su mineralización asociada en el área del Bajo de La Alumbraera (departamento Belén, provincia de Catamarca, Argentina). Estas muestras contribuyeron a definir todo el distrito como una de las regiones cupro-auríferas más importantes de Argentina en el marco del llamado “Cinturón Metalogénico de Pórfidos de Cobre Andinos”. Para la evaluación

patrimonial de los testigos de perforación en colección se consideraron criterios que refieren tanto a su valor científico como educativo e histórico.

Palabras clave: patrimonio geológico, testigos de perforación, geoconservación *ex-situ*.

Drill cores from the Bajo de La Alumbra deposit, Catamarca, Argentina, as *ex situ* geoheritage elements. Drill core samples from mineralized rock areas form, among other uses, the basis for preliminary analyses to determine the technical and economic feasibility of a potential mining operation. These samples, particularly in contexts where mining activities advanced to the point that no original source rocks remained, represent unique geological records from a scientific and historical perspective, acquiring significant value as movable geoheritage. This study analyzes the importance, as *ex situ* geoheritage, of the drill cores from the rock units of the Farallón Negro Volcanic Complex (9.0-6.8 Ma) and their associated mineralization in the Bajo de La Alumbra area (Belén Department, Catamarca Province, Argentina). These samples contributed to defining the entire district as one of the most important copper-gold regions in Argentina within the so-called “Andean Porphyry Copper Metallogenic Belt.” For the heritage assessment of the drill cores in the collection, scientific, educational, and historical value criteria were considered.

Key words: geoheritage, drill cores, *ex-situ* geoconservation.

1. Introducción

El concepto de patrimonio geológico ha evolucionado desde una concepción original que abordaba sólo algunos aspectos de elementos notorios de la geología *in situ*, a la inclusión también de aquellos elementos removidos desde su ubicación original hacia colecciones. Estas últimas son de carácter *ex situ* y cumplen una función similar a la de los geositos:

aportar la base geocientífica empírica como evidencia irremplazable de un pasado geológico (Brilha, 2016; ProGEO, 2022; Cleal y King, 2025). En explotaciones mineras con desarrollo extractivo avanzado o culminado, como en el caso del Bajo de La Alumbrera, la explotación y procesamiento del material termina por eliminar de manera irreversible gran parte de los afloramientos de interés (Henriques *et al.*, 2011). En este sentido, los testigos de perforación obtenidos durante las distintas etapas exploratorias de un yacimiento, muchos de ellos resguardados en colecciones, se convierten en los únicos registros físicos que pueden proveer información mineralógica, petrográfica, estructural y metalogénica de un determinado sector. Adicionalmente, al estar la explotación íntimamente relacionada al desarrollo social y económico de una región, los testigos en resguardo adquieren valor histórico y cultural (Mazadiego Martínez, 2003; Sánchez Rodríguez, 2010).

Para la República Argentina, son escasas las citas en el ámbito científico referidas a la declaración patrimonial *ex situ* de testigos de perforación de origen minero o de otro tipo (Lema et al., 2014). No obstante, cabe señalar que a partir de la Ley Nacional N°24.466 (1995), se crea el Banco Nacional de Información Geológica bajo dependencia orgánica y funcional de la Secretaría de Minería de la Nación. Esta entidad recopila, registra y pone a disposición toda la información geológica existente en la administración pública, universidades y entes estatales. En el año 2025, mediante el Decreto N°449 del Poder Ejecutivo Nacional, su dependencia orgánica fue asignada al Servicio Geológico Minero Argentino (Segemar). Este organismo posee repositorios en su sede central, así como en sus diferentes delegaciones provinciales, para el resguardo y conservación de materiales, entre ellos testigos de perforación. Uno de estos repositorios estaba a cargo de la delegación de la provincia de Tucumán, el cual incluía muestras de perforación correspondientes a las áreas mineralizadas Bajo de La Alumbrera, Filo Colorado, Las Juntas, Cerro Atajo, El Durazno,

Vaca Vizcana, Cerro Toronado, La Hoyada y Alto La Blenda. Esta colección fue recientemente remitida a la delegación central del Segemar en la provincia de Buenos Aires.

Bajo de La Alumbrera no sólo ha sido una explotación de gran relevancia económica, siendo durante décadas el yacimiento de cobre y oro más importante de Argentina, sino también un ejemplo clásico de sistema de tipo pórfido cuprífero rico en oro (Cu, Au, Mo), con zonaciones litológicas e hidrotermales características de este estilo de yacimientos. En este sentido, sus muestras poseen interés mineralógico y petrológico para la comprensión de los procesos responsables de la concentración de metales de interés económico en la corteza terrestre y pueden servir de referencia para la exploración de yacimientos similares en la región andina.

El presente trabajo analiza y evalúa, desde una perspectiva patrimonial y mediante la aplicación de criterios internacionales, testigos de perforación provenientes del núcleo mineralizado del Bajo de la Alumbrera obtenidos durante su etapa de exploración. La finalidad es poder establecer lineamientos para su conservación, resguardo y uso controlado debido a su carácter patrimonial excepcional (Brilha, 2016; ProGEO, 2022; Díaz Martínez *et al.*, 2025). Las muestras bajo estudio fueron donadas oportunamente por la empresa Minera Alumbrera Ltd. al Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO, Universidad Nacional de Tucumán-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) y se encuentran preservadas en la colección de rocas del mismo. Estas muestras constituyen un testimonio único de algunos sectores del yacimiento que ya han sido explotados, por lo que representan un legado científico invaluable para futuras investigaciones, así como un legado histórico de una localidad de referencia en la geología argentina.

2. Antecedentes y geología del área de explotación

El yacimiento minero Bajo de La Alumbrera se ubica en el departamento Belén, provincia de Catamarca (noroeste de Argentina), y constituye uno de los depósitos de cobre y oro más notorios de los Andes Centrales (Sasso y Clark, 1998; Ramos, 1999; Proffett, 2003; Halter *et al.*, 2004; Harris *et al.*, 2006; Candiani *et al.*, 2025) (Fig. 1). Este yacimiento estuvo en explotación entre los años 1997 y 2018 y fue operado por diversas empresas y Uniones Transitorias de Empresas (UTES) (e.g., X-Strata, Yamana Gold, Goldcorp). Si bien hace unos años se encontraba en etapa de cierre de mina, en diciembre del año 2025 la empresa Glencore Plc. anunció el reinicio de las operaciones de producción para la explotación de los recursos minerales remanentes en el yacimiento (BnAmericas, 2025). Los derechos de exploración y explotación del área pertenecen a Yacimientos Mineros de Agua de Dionisio (YMAD), una sociedad interestadual integrada por el Gobierno de Catamarca (60%) y la Universidad Nacional de Tucumán (40%) (Minera Alumbrera, 2025a).

El área del Bajo de La Alumbrera constituye un bajo topográfico natural formado por la erosión diferencial de las distintas zonas de alteración del depósito mineral (Fig. 2). Esta erosión, a lo largo de millones de años, expuso la parte superior de un sistema tipo pórfido (Fig. 3A, B). Previo a su explotación, el bajo ocupaba una superficie de unos 2,5 km² con una elevación central promedio de 2.550 m s.n.m. (Minera Alumbrera, 2025b).

El yacimiento se encuentra emplazado en rocas de composición andesítica del Complejo Volcánico Farallón Negro de edad miocena superior (Sasso y Clark, 1998; Proffett, 2003; Halter *et al.*, 2004; Harris *et al.*, 2006). Su origen se ha ligado a la presencia de estructuras de escala regional, entre las que se encuentra el lineamiento Farallón-Culampajá (Wernert *et al.*, 2019 y referencias allí citadas). Esta conjugación tectónica favoreció, durante el Mioceno, el desarrollo de aparatos volcánicos los cuales habrían alcanzado alturas máximas cercanas a los 5.000 m s.n.m. (Malvicini y Llambías, 1961; Llambías, 1970, 1972;

Harris *et al.*, 2006). Los núcleos mineralizados de estos volcanes, denudados y expuestos por los agentes meteóricos, constituyen el distrito minero en cuestión (Fig. 3B, C).

La litología del área está representada principalmente por una secuencia de andesitas, dacitas, brechas volcánicas y pórfidos subvolcánicos (Malvicini y Llambías, 1961, 1963; Sasso y Clark, 1998; Proffett, 2003; Halter *et al.*, 2004). Las andesitas forman la roca de caja de cuerpos intrusivos dacíticos de tipo pórfido y se presentan con estructura maciza y textura porfiroafanítica, conformada por fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda en una matriz afanítica microcristalina. Los cuerpos subvolcánicos de tipo pórfido, por su parte, presentan fenocristales de feldespato potásico, plagioclasa, biotita y cuarzo, inmersos en una matriz mayormente afanítica, y poseen las principales mineralizaciones de cobre y oro (Jones, 1994; Proffett, 2003). La estratigrafía volcánica y la arquitectura de las facies reconocidas en el área sugieren que el volcanismo evolucionó de estilos efusivos a explosivos a medida que las composiciones del magma cambiaban a intermedias y ácidas (Halter *et al.*, 2004; Harris *et al.*, 2006).

Desde el punto de vista de la génesis del yacimiento, la interacción prolongada de estas rocas volcánicas con fluidos hidrotermales generó un conjunto de alteraciones con zonación espacial característica de sistemas tipo pórfido (Proffett, 2003; Brown, 2005) (Fig. 4). Se distinguen tres tipos de alteración en un arreglo concéntrico: una zona central de alteración potásica (Fig. 4A, C), un halo externo de alteración clorita-epidota que rodea a la primera zona (Fig. 4B) y, sobreimpuesta a ambas, una alteración destructiva de feldespatos (alteración fílica y argílica; Fig. 4D). La alteración potásica predomina en el núcleo mineralizado, donde se observa biotita secundaria fina y plagioclasa parcialmente reemplazada por feldespato potásico, así como parches de biotita en la matriz asociados por lo general a la mineralización de cobre y oro. La alteración fílica o sericítica se presenta

mediante halos alrededor de venillas de cuarzo y sulfuros y también como reemplazo de plagioclasa y minerales máficos. La alteración argílica, por su parte, se localiza en los bordes de los halos de alteración potásica, principalmente en sectores de fallas. Rodeando todo el depósito se observa una alteración de tipo clorita-epidota, presente principalmente en la matriz de la roca (Proffett, 2003; Borba *et al.*, 2016).

La mineralización metálica está dominada por calcopirita, abundante pirita y bornita subordinada. La calcopirita se presenta tanto de manera diseminada como en venillas (Ulrich y Heinrich, 2002); corresponde al principal mineral de cobre y se encuentra asociada a la presencia de oro. Los mejores contenidos de cobre y oro se concentran por lo general en aquellos sectores donde la alteración potásica es predominante, aunque no se ha determinado una relación directa entre el grado de alteración y la mineralización, presentándose a veces la roca fuertemente alterada, pero con bajas leyes de cobre y oro, así como zonas débilmente alteradas que contienen altas leyes (Proffett, 2003). Otros sulfuros presentes en el yacimiento incluyen molibdenita, galena y esfalerita junto a sulfosales. Las principales venillas están constituidas por cuarzo-calcopirita±pirita, carbonatos con sulfuros de metales base, cuarzo-magnetita y magnetita, las cuales evidencian el desarrollo de varios pulsos de mineralización y alteración.

Respecto a la evolución estructural, el yacimiento se encuentra afectado por fallamientos post-mineralización que abarcan diferentes litologías, alteraciones y mineralizaciones. En la parte central y al este del bajo predominan fallas normales de rumbo nornoroeste-sursureste con fuerte buzamiento hacia el oeste, mientras que en el sector suroeste se observan fallas normales con dirección noroeste-sureste y buzamiento hacia el noreste (Proffett, 2003).

3. Material analizado y valoración patrimonial

La colección depositada en el INSUGEO fue donada al Instituto en el año 2017 por Minera Alumbreira Ltd. a través de su Departamento de Geología y Geotecnia. La misma se compone de 15 cajas (portatestigos con tapas de aglomerado) con testigos de perforación, representativos de las principales litologías y zonas de alteración del yacimiento. Desde el punto de vista petrográfico y mineralógico, las muestras conservadas corresponden principalmente a andesitas y pórfidos dacíticos (Fig. 4).

Las muestras están identificadas con el nombre de la perforación y el intervalo de profundidad expresado en metros. Colectivamente representan 85,68 m lineales de perforación de tipo diamantina en diámetro HQ y NQ (63,5 y 47,6 mm, respectivamente) y provienen de un área actualmente inexistente por explotación plena entre las cotas 2.500 y 1.900 m s.n.m. (Fig. 2). Los testigos muestran grados variables de integridad por fragmentación (Fig. 5).

Para la evaluación patrimonial integral del material se aplicaron criterios basados en Pereira (2010), Brilha (2016), Crofts *et al.* (2020) y Díaz Martínez *et al.* (2025), los cuales fueron combinados y articulados entre sí en una nueva propuesta adaptada a la realidad de los elementos considerados. Este marco metodológico posee una base cuantitativa de acuerdo con el valor intrínseco, potencialidad de uso y vulnerabilidad del material (Tabla 1). Cada uno de estos valores se subdividió en criterios acompañados de una descripción y una justificación a partir de la cual se asignó un puntaje variable entre 1 y 3. La sumatoria de los puntajes asignados a los diferentes criterios dio 28 (de un máximo de 33 puntos posibles y un mínimo de 11), lo cual es significativamente alto, por lo que el material en consideración posee un alto interés patrimonial. La evaluación del material de acuerdo con los diferentes valores y criterios considerados en la Tabla 1 se detalla a continuación:

Valor intrínseco: Criterios de *abundancia e integridad física*. Los testigos evaluados representan material obtenido de sectores del yacimiento explotados en su totalidad. Corresponden a ejemplares de niveles muestreados en etapas exploratorias que requieren un resguardo activo y eficiente. En general, el material se presenta como testigos de roca mayormente intactos, aunque existen escasos tramos fragmentados con baja recuperación.

Valor científico-educativo: Criterios de *conocimiento científico, representatividad, posibilidad de realizar actividades científicas e investigaciones complementarias, posibilidad de realizar actividades didácticas-divulgativas y relevancia científica*. Los testigos son evidencia petrográfica y mineralógica excepcional del cuerpo principal del yacimiento tras la explotación. Los materiales evaluados representan una geología que ya no existe *in situ*, por lo que corresponden a un registro único del yacimiento. Si bien se cuenta con un conocimiento detallado de las muestras debido a los numerosos estudios a las que fueron sometidas durante las etapas de exploración y explotación, su correcto resguardo abre una puerta a estudios futuros (e.g., petrología, metalogenia, geotecnia) y a la posibilidad de análisis comparativos con otros yacimientos de este tipo.

En términos generales, la geología y sus temas de asociación directa suelen considerarse de manera insuficiente en los currículos educativos pese a su enorme relevancia histórica, científica y cultural (Domingo i Morató y Sequeiros, 1998; Calongue et al., 2022; López-Martínez, 2024). En este sentido, toda acción tendiente a poner en valor a las ciencias geológicas redunda positivamente en la sociedad, en particular cuando se trata de asuntos sensibles como por ejemplo la explotación de los recursos minerales en una localidad. La

posibilidad de contar con estos materiales para fines didácticos contribuye a acercar la geología a la sociedad y proporciona herramientas para realizar actividades docentes y de divulgación, ya sea a través de programas académicos o mediante la exhibición e integración a museos o centros interpretativos. Un ejemplo de esto último sería el aprovechamiento de guarda de los testigos en el Parque Geológico INSUGEO, donde la exhibición y presentación de estos materiales aportaría al acercamiento de la actividad minera a la sociedad.

Valor turístico: Criterio de *accesibilidad física*. Los testigos podrían ser utilizados con fines de turismo científico-educativo asociado a las muestras estáticas y móviles del Parque Geológico INSUGEO.

Valor geológico-cultural: Criterios de *folklore e identidad y valor histórico*. La ponderación bajo este criterio se fundamenta en el hecho de que los testigos representan las características geológicas típicas de un yacimiento de tipo pórfido cuprífero rico en oro, el que a su vez fue el primer y único proyecto de megaminería explotado en territorio argentino por más de dos décadas (período 1997-2018). Asimismo, se destaca que históricamente el sector de Agua de Dionisio ha sido un “proveedor” de minerales desde la época de la conquista (Gianfrancisco, 2008). Particularmente, la historia de todo el distrito minero YMAD es importante para la provincia de Tucumán debido a su estrecho vínculo con la Universidad Nacional de Tucumán a partir de su hallazgo y puesta en valor por el Dr. Abel Peirano durante las primeras décadas del siglo pasado (Aceñolaza, 2009). Esto posibilitó que la universidad se posicionara fuertemente en el ámbito de la minería regional, recibiendo en tiempos recientes ingresos derivados de las actividades de explotación (Aceñolaza, 2013).

Valor de vulnerabilidad: Criterios de *amenazas actuales o potenciales y fragilidad*.

Durante la etapa inicial de toma de muestras no se registra pérdida de material salvo una baja recuperación en escasos tramos. Tampoco se reportan problemas con la identificación de las cajas, ya que el manejo, rotulación, resguardo y gestión integral de las mismas se encuentran estandarizados bajo protocolos internos específicos de acuerdo con guías internacionales de buenas prácticas, implementados por la empresa durante su obtención. Los procesos de gestión de muestras fueron estrictamente controlados, desde su obtención, traslado y estudio hasta su resguardo definitivo. Actualmente, las muestras se encuentran en la colección de rocas del INSUGEO bajo condiciones de preservación óptimas y sin ningún indicio de degradación. Sin embargo, no se cuenta aún con una normativa de uso reglamentada, lo cual constituye la única amenaza potencial de vulnerabilidad. En consecuencia, y para evitar posibles riesgos, el manejo de los testigos se restringe por ahora solo a especialistas.

4. Propuesta de gestión patrimonial

Con el fin de hacer un uso eficiente de las muestras en términos de gestión, conservación y puesta en valor, se sugiere:

- a) Realizar una declaración formal del bien patrimonial mediante la inclusión de la colección a un inventario patrimonial institucional, actualmente inexistente, que considere el contexto reglamentario vigente (normativas nacionales y provinciales sobre patrimonio).
- b) Implementar la custodia institucional en el marco de la colección de rocas del INSUGEO y su depósito formal en un ámbito físico apropiado de acuerdo con la naturaleza de las muestras.
- c) Armar un plan de conservación y manejo físico del material que contemple la elaboración de fichas impresas (para ser adjuntadas internamente a las cajas portatestigos)

con información relevante del pozo (e.g., localización, profundidad, inclinación) y de las muestras (e.g., litología, mineralización, alteración, fecha de toma de muestra, ubicación y profundidad de proveniencia).

Complementariamente a esta propuesta, se plantea el desarrollo de un catálogo en línea que involucre la digitalización de imágenes y datos técnicos que puedan vincularse a la página institucional del INSUGEO (www.insugeo.org.ar), lo cual permitiría disponer de fotografías de detalle y descripciones petrográficas georreferenciadas. A su vez, debido a su carácter de colección geológica de interés científico, es imprescindible generar una normativa de acceso regulado a los materiales, ya sea para investigación, docencia o divulgación, aprovechando el marco del parque geológico institucional desarrollado en la localidad de Horco Molle (Yerba Buena, Tucumán). De prosperar esto último, su exhibición revalorizaría la importancia de la minería en general y del Bajo de la Alumbrera en particular, para el avance y desarrollo de la sociedad.

5. Consideraciones finales

Los testigos de perforación del Bajo de La Alumbrera analizados en este trabajo constituyen elementos patrimoniales *ex situ* de amplio interés, por lo que pueden considerarse como una colección científica de relevancia. Su importancia radica en que representan un archivo geológico único del yacimiento de tipo pórfido cuprífero rico en oro más importante de Argentina. Al determinar su valor intrínseco, científico-educativo, turístico y geológico-cultural, así como su vulnerabilidad, se establece que esta colección posee un muy elevado valor patrimonial.

El detallado registro de procedencia de estos testigos de perforación puede posibilitar estudios comparativos y complementarios a aquellos clásicos análisis mineralógicos,

petrográficos, geoquímicos y metalogénicos llevados a cabo durante las etapas de exploración, desarrollo y explotación del yacimiento. Para esto, se enfatiza la necesidad de reglamentar el uso de los testigos en resguardo bajo una normativa formal y un manejo responsable para un correcto uso del material. En este sentido, se sugiere su incorporación formal como patrimonio geológico al inventario institucional. Con el objetivo de lograr una eficiente custodia en el marco de la colección de rocas del INSUGEO-UNT-CONICET, se enfatiza la necesidad de elaborar protocolos para investigación, así como también para una política de difusión formal con exhibición parcial en el ámbito de resguardo, museos y/o centros interpretativos.

El cuidado de la colección enfrenta desafíos propios de cualquier material *ex situ*, como el deterioro físico, su posible dispersión, pérdida y/o mala gestión. Tanto su declaratoria como elemento patrimonial geológico *ex-situ*, así como la implementación de medidas de conservación, constituyen medidas urgentes para garantizar su preservación, su aprovechamiento científico y educativo, y/o su uso en actividades de extensión que pongan en valor la geología y la minería como parte esencial de la vida cotidiana y el desarrollo de la sociedad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Minera Alumbra Ltd. por la valiosa donación de los testigos de perforación que fueron objeto de este estudio al Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO-CONICET-UNT). Asimismo, un sincero agradecimiento a F. Miranda, L. Sánchez y a un revisor anónimo por sus comentarios y evaluación de este trabajo. Finalmente, agradecemos a D. Bertin por el manejo editorial.

Referencias

- Aceñolaza, F.G. 2009. Descole, una pasión universitaria. EdUNT, 186 pp. Tucumán, Argentina. ISBN: 978-987-1366-48-4.
- Aceñolaza, F.G. 2013. Farallón Negro: Epopeya de un sueño minero. Instituto Superior de Correlación Geológica, Miscelánea 20: 1-100. Tucumán, Argentina.
- Alderete, M.C. 2004. Distrito Yacimiento Mineros Agua de Dionisio (YMAD). En: Historia de la Minería Argentina (E. Lavandaio y E. Catalano editores). SEGEMAR, Anales 40 (2): 21-42.
- BnAmericas. 2025. <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/alumbrera-vuelve-glencore-reanuda-operacion-en-2026-para-acelerar-proyecto-de-us-4000mn-en-argentina>
- Borba, M.L.; Chemale, F.; Kawashita, K.; Takehara, L.; Babinski, M.; Bruckman, M. 2016. The Bajo de la Alumbrera and Agua Rica Cu–Au (Mo) porphyry deposits of Argentina: genetic constraints on ore formation and sources based on isotope signatures. *Ore Geology Reviews* 75: 116–124.
- Brilha, J. 2016; Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: A Review. *Geoheritage* 8 (2): 119-134.
- Brown, S.C. 2005. A Review of the Geology and Mineralization of the Alumbrera Porphyry Copper-Gold Deposit, Northwestern Argentina. En: *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective* (Porter, T.M. Editor), PGC Publishing, Adelaide, 1: 115-131.
- Calonge García, A.; Molina, E.; Alfaro P. 2022. Training and dissemination about the environment: Key to impulse the abiotic component of environmental education. En: *Enhancing environmental education through nature-based solutions*. (Vanconcelos, C; Calheiros, C.S. Editores), Springer Nature, Suiza: 9-24.

- Candiani, J. C.; Seggiaro, R.; Carrizo, N.; Pereyra, F. 2025. Hoja geológica 2766-III Belén. Provincias de Catamarca y Tucumán. 113 pp. Boletín N.º 457. Buenos Aires: Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales. ISSN 0328-2333.
- Cleal, C.j.; King, S.G. 2025. Museum collections as geoheritage. *Geoheritage* 17: 155-173. DOI: 10.1007/s12371-025-01165-7
- Crofts, R.; Gordon, J.E.; Brilha, J.; Gray, M.; Gunn, J.; Larwood, J.; Santucci, V.L.; Tormey, D.; Worboys, G.L. 2020. Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 31. Gland, Switzerland: IUCN. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.31.en
- Decreto 449/2025 [Leyes 24196 y 24466 - Modificación]. 2025. Poder Ejecutivo Nacional (7 de julio de 2025). Boletín Oficial de la República Argentina, N° 35.701. <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=414813>
- Díaz Martínez, E.; Carcavilla Urquí, L., Vegas, J., Lozano, G.; Rábano, I.; Delvene, G. 2025. Patrimonio geológico y geoconservación: marco conceptual y perspectivas. En: Aceñolaza, G.F., Aráoz, L., Bellos, L.I., Medina, W. (Eds.), *Geología y Patrimonio de los Valles Calchaquíes del Norte Argentino*. INSUGEO. 9 pp. En prensa.
- Domingo i Morató, D.M.; Sequeiros, L. 1998. Extinción de la Geología en España: Alerta roja. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 6 (3): 206-210.
- Gianfrancisco, M. 2008. Historia del Distrito Minero Farallón Negro. Catamarca, Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 21 (1): 44.
- Harris, A.; Bryan, S.; Holcombe R. 2006. Volcanic Setting of the Bajo de la Alumbrera Porphyry Cu-Au Deposit, Farallon Negro Volcanics, Northwest Argentina. *Economic Geology* 101 (1): 71-94.

- Halter, W.; Bain, N.; Becker, K.; Heinrich, C.; Landtwing, M.; Von Quadt, A.; Clark, A.B.; Sasso, A.M.; Bissig, T.; Tosdal, R. 2004. From andesitic volcanism to the formation of a porphyry Cu-Au mineralizing magma chamber: The Farallón Negro Volcanic Complex, northwestern Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 136 (1–2): 1–30.
- Henriques, M. H.; Pena dos Reis, R.; Pereira, D.; Brilha, J.; Penco, J. 2011. The value of drill cores as geoheritage: Examples from Portugal. *Episodes* 34 (1): 40–48.
- Jones, J.P. 1994. The Farallón Negro Bajo de la Alumbrera Volcanic-Plutonic cluster. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra. En: Congreso Geológico Chileno N°7. Actas: 1571–1575.
- Lema, H.; Etcheverria, M.; Mendiá, J.; Miranda, F.; Rodríguez, M. F. 2014. Patrimonio Documental e Histórico y el valor de los inventarios. En: XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba. Actas: Simposio 8 – 13.
- Ley Nacional 24466. 1995. Congreso de la Nación Argentina (7 de abril de 1995). *Banco Nacional de Información Geológica*. Boletín Oficial de la República Argentina, N° 28.120. <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=16622>
- Llambías E.J. 1970. Geología de los yacimientos mineros de Agua de Dionisio, provincia de Catamarca, República Argentina. *Revista Asociación Argentina Mineralogía, Petrología y Sedimentología* 1: 2–32.
- Llambías E.J. 1972. Estructura del Grupo volcánico Farallón Negro, Catamarca, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 27: 161–169.
- López-Martínez, F. 2024. La Geología, ¿una ciencia suficientemente valorada en la educación secundaria?. *Revista de la Sociedad geológica de España*, 37(2): 3–13.

- Malvicini, L.; Llambías, E.J. 1961. Estudio de la Veta de Farallón Negro. Dirección General de Minería, Ministerio de Economía de la Nación, Buenos Aires, Argentina. 9 pp.
- Malvicini L.; Llambías E.J. 1963. Mineralogía y origen de los minerales de manganeso y sus asociados en Farallón Negro, Alto de la Blenda y Los Viscos, Hualfín, Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina 18: 177-197.
- Mazadiego Martínez, L.F. 2003. Folclore, leyendas y costumbres mineras: El patrimonio inmaterial de la minería. Congreso internacional sobre patrimonio geológico y minero N°4, Actas: 93-108. Teruel, España.
- Mezzetti, A. M.; Llambías, E. J. 1963. Informe sobre las áreas de alteración hidrotermal en Agua de Dionisio. Distrito Hualfín. Departamento Belén. Provincia de Catamarca. Dirección Nacional de Geología y Minería. Secretaría de Estado de Industria y Minería. Buenos Aires. 44 pp. (Informe Inédito).
- Minera Alumbrera Ltd. 2025a. Historia. Recuperado el 20 de noviembre de 2025 de <http://www.alumbrera.com.ar/quienes-somos/historia/>.
- Minera Alumbrera Ltd. 2025b. Geología del yacimiento. Recuperado el 20 de noviembre de 2025 de <http://www.alumbrera.com.ar/quienes-somos/geologia-del-yacimiento/>.
- Pereira, R. 2010. Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahía, Brasil) Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidade do Minho. Braga, Portugal. 265 pp.
- Proffett, J. 2003. Geology of the Bajo de la Alumbrera Porphyry Copper-Gold Deposit, Argentina. Economic Geology 98: 1535-1574.
- ProGEO, 2022. Conserving our shared geoheritage: A global strategy. The European Association for the Conservation of Geological Heritage. ProGEO/IUGS Geoheritage Working Group. Brussels.

- Ramos, V. A. 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: R. Caminos (Ed.), Geología Argentina Anales 29: 41-96. Buenos Aires.
- Sánchez Rodríguez, A. 2010. Estudio del Patrimonio Minero de Extremadura. En: Una visión multidisciplinar del patrimonio geológico y minero. Instituto Geológico y Minero de España. (P. Florido; I. Rábano editores). Cuadernos del Museo Geominero 12: 3-30. ISBN 978-84-7840-836-8.
- Sasso, A.; Clark, A. 1998. The Farallon Negro group, Northwest Argentina: magmatic, hydrothermal and tectonic evolution and implications for Cu-Au metallogeny in the Andean back-arc. Society of Economic Geologists Newsletter 34: 1-17.
- Sister, R.G. 1963. Informe geológico económico de Farallón Negro y zona adyacente. Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán. Opera Lilloana 8.
- Ulrich, T.; Heinrich, C.A. 2002. Geology and Alteration Geochemistry of the Porphyry Cu-Au Deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina, Economic Geology 97: 1865-1888.
- Wernert, M.S.; García, J.M.; Mutti, D.I. 2019. Analisis estructural del Sistema vetiforme Farallón Negro-Alto de La Blenda, Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina 76 (4): 391-402.

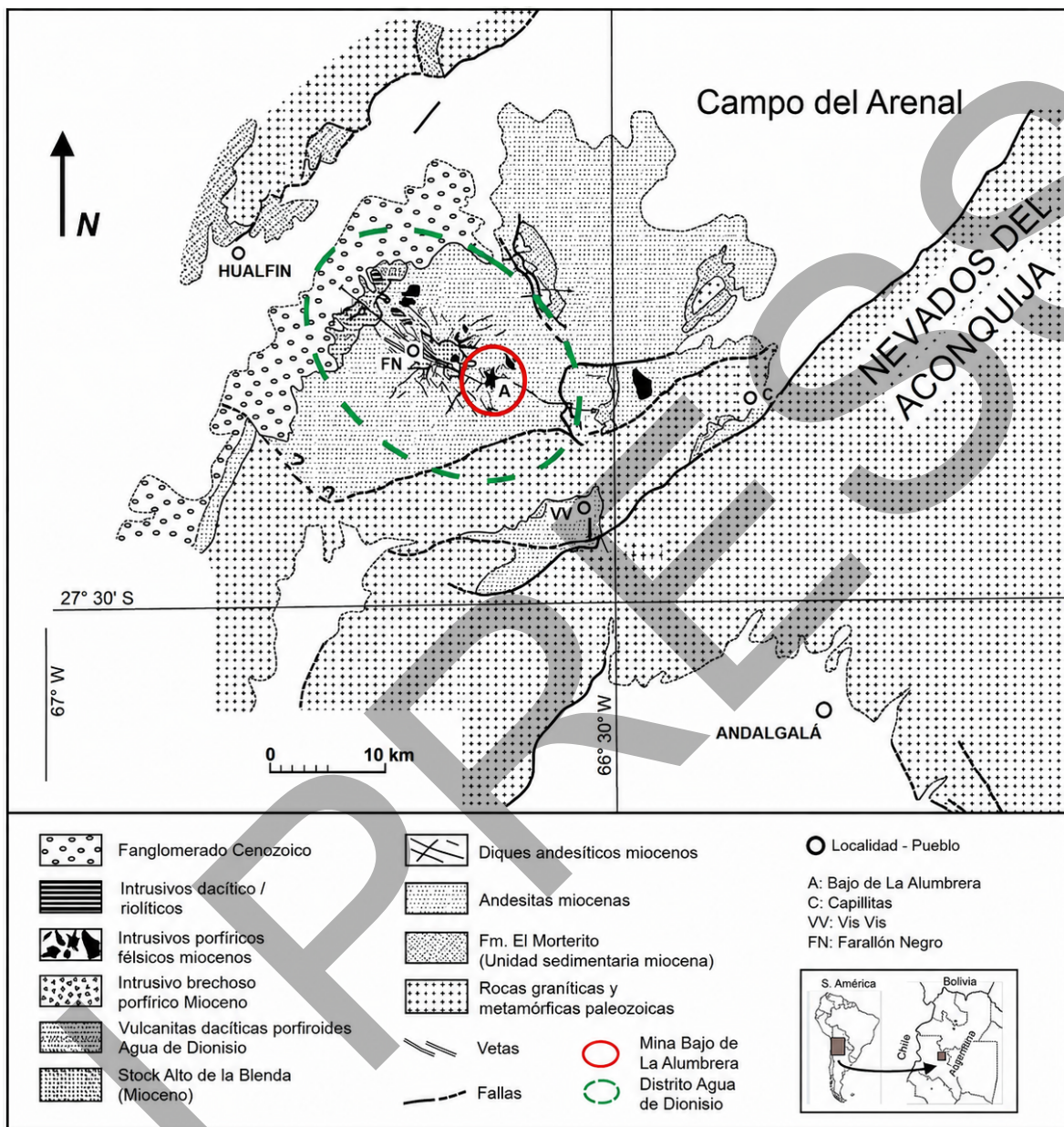


Fig. 1. Ubicación del Bajo de La Alumbraera (departamento Belén, provincia de Catamarca, Argentina) y geología del área (modificado de Proffett, 2003).

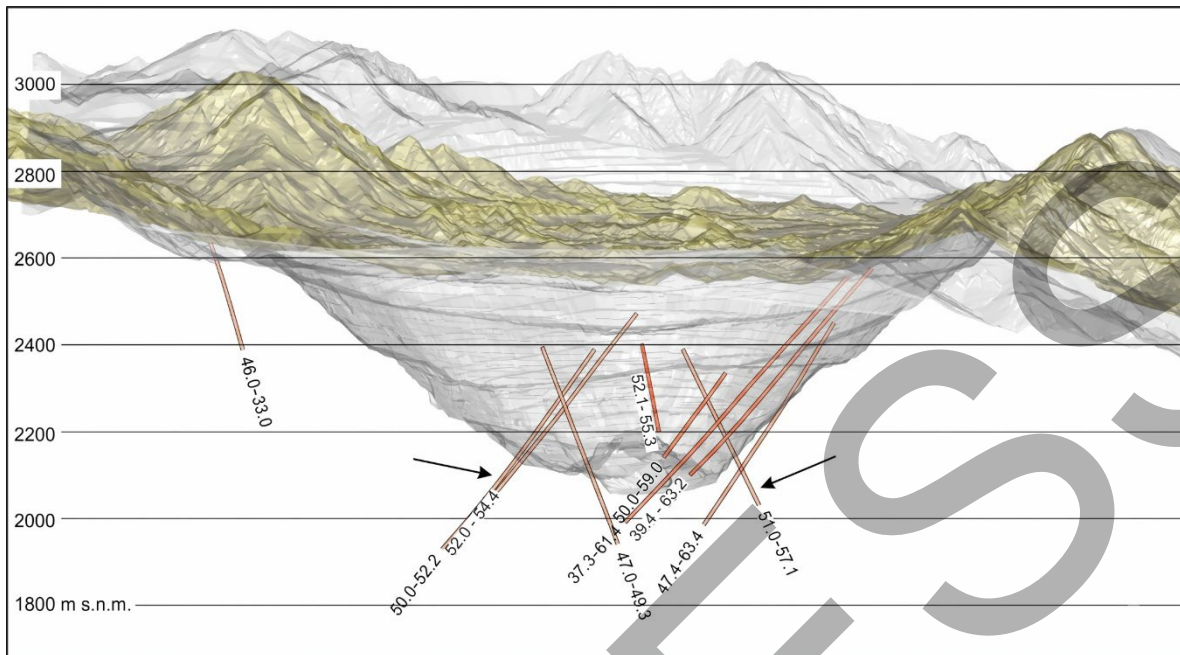


Fig. 2. Vista 3D del sector explotado del Bajo de La Alumbraera desde el sureste al noroeste. Se aprecia la topografía original (color amarillo) superpuesta a la topografía con el volumen excavado por la explotación (en gris) así como la ubicación de las perforaciones históricas con su denominación. Las flechas negras identifican las perforaciones cuyos testigos se encuentran actualmente en custodia del INSUGEO y que constituyen parte de la evidencia directa preservada de esta porción del yacimiento (vista generada con el programa MineSight).

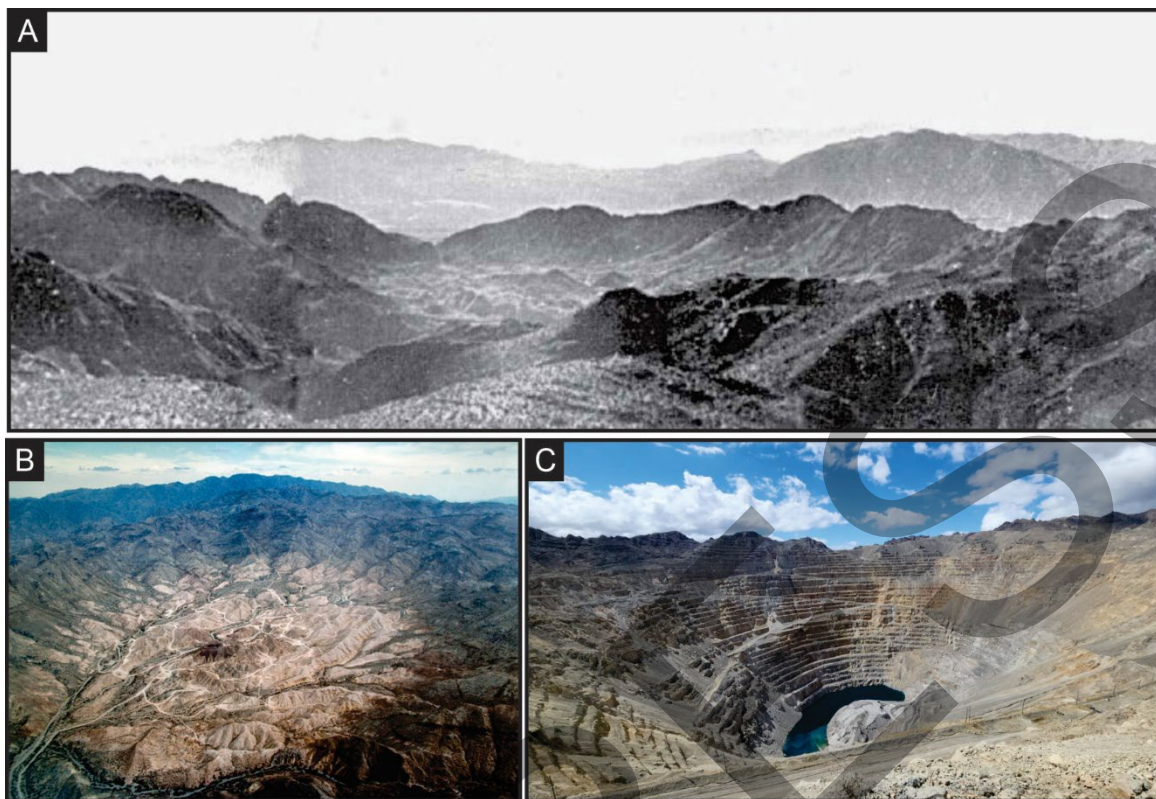


Fig. 3. **A.** Fotografía histórica del Bajo de La Alumbraera (Sister, 1963, tomada de Alderete, 2004) en la zona de mineralización diseminada descrita tempranamente por Mezzetti y Llambías (1963). **B.** Fotografía aérea del Bajo de La Alumbraera a principios de la década de 1990, previo al inicio de su explotación. **C.** Vista hacia el sureste del *open pit* desarrollado en la zona mineralizada, lugar de procedencia de las muestras evaluadas en este trabajo.



Fig. 4. Muestras de testigos de roca del Bajo de La Alumbrera. **A.** Pozo 50.0-59.0. Roca andesítica con alteración potásica; A1: venilla de yeso (Gp) con pirita (Py) y asociación de pirita y calcopirita (Ccp); A2: detalle de calcopirita y venillas de yeso y cuarzo (Qtz); A3: detalle de venilla mayoritariamente de yeso junto a otras de cuarzo. **B.** Pozo 46.0-33.0. Roca andesítica con alteración de tipo clorita-epidota; B1: epidota (Ep) en parches en la matriz de la roca, junto a clorita (Chl) secundaria tanto en la matriz como en minerales máficos; B2: epidota y clorita como minerales de reemplazo en la matriz. **C.** Pozo 52.0-54.4. Pórfido dacítico con alteración potásica típica; C1: cristales de feldespato potásico (Kfs) y biotita secundarios, con calcopirita (Ccp), pirita (Py) y magnetita, venillas de cuarzo (Qtz) y carbonatos (Cb); C2: alteración potásica con presencia de feldespato potásico y biotita (Bt), magnetita en matriz y venillas capilares, y calcopirita en matriz y venillas. **D.** Pozo 39.4-63.2. Pórfido dacítico con alteración destructiva de feldespatos; D1: sericita en cristales de plagioclasa, cuarzo en la matriz, venillas de pirita (Py) y óxidos secundarios, y presencia de limonita (Lm); D2: fenocristales de plagioclasa con reemplazo de sericita (Ser) y caolinita (Kln), clorita sobre biotita, y venilla con óxidos. Ubicación de pozos en figura 2.



Fig. 5. Cajas portatestigos de madera y tapas de aglomerados con las rotulaciones originales (izquierda). Secciones con baja recuperación por fragmentación de testigos durante la extracción (derecha).

Tabla 1. Tabla de valoración patrimonial adaptada a testigos de perforación. La valoración de los diferentes criterios indica un puntaje de 28 sobre un máximo de 33 puntos y un mínimo de 11, lo cual indica un alto interés patrimonial.

Tipo de valor	Criterio	Descripción del criterio	Puntaje	Justificación del puntaje asignado
Valor intrínseco	Abundancia	Número de ocurrencias semejantes. Se valora la rareza o el único ejemplo o caso.	3	Material representativo de áreas ya explotadas en su totalidad. Corresponden a ejemplares específicos de niveles muestreados en etapas exploratorias.
	Integridad física	Se analiza el grado de deterioro del elemento.	2	Testigos mayormente intactos, aunque existen escasos tramos fragmentados con baja recuperación.
Valor científico-educativo	Conocimiento científico	Marca el grado de importancia que le fue atribuido por la comunidad académica o científica.	1	Los testigos poseen estudios desde una perspectiva económica-minera. Carecen de estudios publicados en revistas científicas.
	Representatividad	Informa sobre la capacidad del elemento para representar adecuadamente las características del yacimiento bajo estudio.	3	Evidencia estratigráfica, petrográfica y metalogénica del sector muestreado del cuerpo mineralizado principal (inexistente en la actualidad por haber sido explotado en su totalidad).
	Posibilidad de realizar actividades científicas e investigaciones complementarias	Informa si el elemento cumple con las condiciones para realizar actividades científicas.	3	Permite análisis litológicos, geoquímicos, estructurales, metalogénicos y geotécnicos.
	Posibilidad de realizar actividades didácticas-divulgativas	Informa si el elemento cumple con las condiciones para realizar actividades didácticas teniendo en cuenta el nivel de conocimiento.	3	Permite analizar las características internas de cuerpos rocosos mineralizados del tipo Cu-porfidico en el ámbito académico.
	Relevancia científica	Hace referencia a la significación científica de los atributos que se destacan del elemento.	3	Representantes destacados de un área altamente mineralizada de la faja central andina cupro-aurífera, actualmente explotada en su totalidad.
Valor turístico	Accesibilidad física	Considera la situación de acceso al elemento.	3	Los testigos podrían ser utilizados con fines de turismo educativo asociados a las muestras estáticas y móviles del Parque Geológico INSUGEO.
Valor geológico-cultural	Folklore, identidad y valor histórico	Evalúa la presencia de mitologías asociadas a elementos geológicos que en muchos de los casos refuerzan la identidad local.	3	Los testigos son representativos de un yacimiento vinculado fuertemente a la historia minera y socioeconómica de la región, como la primera explotación minera de cobre y oro a gran escala del país y de alto impacto social.
Vulnerabilidad	Amenazas actuales o potenciales	Evalúa el peligro de pérdida o deterioro del elemento.	2	Si bien los testigos se encuentran al resguardo del INSUGEO, actualmente carecen de normativa y de protocolos de uso que garanticen una conservación adecuada a futuro.
	Fragilidad	Indica la vulnerabilidad del elemento ya sea por sus dimensiones o por su naturaleza.	2	Si bien es material rocoso resistente, podría presentar cierta fragilidad en caso de mal manejo.