

ISSN 0567-7513

ACTA GEOLOGICA LILLOANA

VOLUMEN 28, NÚMERO 1



Fundación Miguel Lillo

TUCUMÁN - ARGENTINA

— 2016 —

Acta geológica lilloana

Serie publicada por la Fundación Miguel Lillo, que tiene como objetivo divulgar trabajos originales sobre ciencias geológicas y afines. Los trabajos son evaluados por al menos dos árbitros externos e internos.

Correo electrónico: actageologicalilloana@gmail.com

I S S N 0 5 6 7 – 7 5 1 3

© 2016, **Fundación Miguel Lillo**. Todos los derechos reservados.

Fundación Miguel Lillo, Miguel Lillo 251, (4000) San Miguel de Tucumán, Argentina
Telefax +54 381 433 0868
www.lillo.org.ar

Editora de *Acta geológica lilloana*: Ana Fogliata.
Secretaria editorial: Lucía Ibañez.
Editor gráfico: Gustavo Sánchez.

Comité editorial:

Dra Ana Fogliata (FML, UNT).
Dra Lucía Ibañez (Secretaria) (FML, UNT).
Dra. Judith Babot (Prosecretaria) (FML).
Dr. Pablo Grosse (FML, CONICET).
Dr. Sergio Georgieff (UNT, CONICET).
Dr. Néstor Abdala (University of the Witwatersrand Johannesburgo, Sudáfrica).
Dr. Carlos Azcuy (CONICET).
Dra. Gabriela García (Universidad Nacional de Córdoba, CICTERRA, CONICET).
Dr. Eduardo Piovano (Universidad Nacional de Córdoba, CONICET).
Dr. Franco Tortello (Universidad Nacional de La Plata, CONICET).
Dr. Ramiro Matos Salinas (Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia).
Dr. Steffen Hagemann (University of Western Australia).
Prof. Dr. Lothar Schrott (University of Salzburg, Austria).

Comité editor asociado:

Dra. Cecilia R. Amenábar (Universidad de Buenos Aires, CONICET).
Dra. Noelia Carmona (Universidad Nacional de Río Negro, CONICET).
Dra. Cecilia del Papa (Universidad Nacional de Córdoba, CICTERRA, CONICET).
Dr. Juan Otamendi (Universidad Nacional de Río Cuarto, CONICET).
Dr. Guillermo E. Alvarado Induni (Instituto Costarricense de Electricidad, Costa Rica).

Publicación indexada en las siguientes bases de datos:

Biosis Previews; Bulletin Signalétique; Latindex (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal); Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas; Periodica (Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias); Referativnyi Zhurnal; SciELO (Scientific Electronic Library Online); Zoological Records.

Canjes:

Centro de Información Geo-Biológico del Noroeste Argentino,
Fundación Miguel Lillo, Miguel Lillo 251, (4000) San Miguel de Tucumán, Argentina.
Correo electrónico: biblioteca@lillo.org.ar

Ref. bibliográfica: *Acta geol. lilloana* 28 (1), 2016.
Periodicidad: un volumen anual en dos números.

Impresión: Artes Gráficas Crivelli.
Propiedad intelectual N° 315450.
Prohibida su reproducción total o parcial.
Impreso en la Argentina.
Printed in Argentina.



XII Congreso de Mineralogía y Metalogenia

5 al 7 de octubre de 2016

San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina

Instituciones organizadoras

Asociación Mineralógica Argentina (AMA)

Fundación Miguel Lillo

CONICET

Comité organizador

Dr. Fernando G. Sardi (INSUGEO y UNT), Dra. Ana S. Fogliata (FML y UNT),
Dr. Miguel A. Báez (INSUGEO y UNT), Dra. Lucía M. Ibáñez (FML y UNT),
Dr. Pablo Grosse (CONICET y FML), Geól. Facundo Martínez (FML y UNT),
Geól. Ana Acosta Nagle (INSUGEO y UNT), Dr. José E. Lazarte (INSUGEO y UNT),
Srta. Carolina Sandalie (UNT).

Comité editor de artículos y resúmenes

Dra. Ana Fogliata, Dr. Pablo Grosse, Dra. Lucía Ibáñez.

Auspiciantes y patrocinadores



Fundación Miguel Lillo



A.M.A.

Asociación Mineralógica Argentina



CONICET

AGENCIA
NACIONAL DE PROMOCIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



INSUGEO

Instituto Superior de Correlación Geológica



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
E INSTITUTO MIGUEL LILLO**
Universidad Nacional de Tucumán

ANÁLISIS DE LAS COMPOSICIONES ISOTÓPICAS DE SULFUROS EN EL DEPÓSITO LOMA GALENA, PROYECTO NAVIDAD, CHUBUT, ARGENTINA

Bouhier, Verónica¹ E.; Rainoldi, Ana L.²; Franchini, Marta³

¹ Centro Patagónico de Estudios Metalogenéticos. INGEOUR-CONICET. Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina. vbouhier@gmail.com

² Centro Patagónico de Estudios Metalogenéticos. CONICET. Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.

³ Centro Patagónico de Estudios Metalogenéticos. CONICET. Universidad Nacional De Río Negro. Argentina.

Resumen. Loma Galena es uno de los ocho depósitos que constituyen el proyecto minero Navidad de Ag+Pb-(Cu+Zn), situado al sudoeste del Macizo Norpatagónico (42°4'S - 68°8'O), provincia del Chubut, Argentina. La mineralización polimetálica tiene características epitermales y está hospedada en rocas volcánicas y sedimentarias continentales depositadas en el depocentro más septentrional de la cuenca jurásica Cañadón Asfalto. Los sulfuros y sulfosales yacen en 3 niveles que difieren entre sí por sus estilos de mineralización y se denominan: inferior, medio y superior. Los valores isotópicos $\delta^{34}\text{S}$ de pirita-galena sugieren una fuente magmática del S (+ 4 y 6,7‰) en el nivel inferior, una fuente sedimentaria (-11,6‰) en el nivel superior y una mezcla de ambas en el nivel medio (-5,5 y 6,1‰). En el nivel superior, el azufre sedimentario habría sido aportado por la disolución de los niveles evaporíticos de la Formación Cañadón Asfalto y en contacto con las pelitas carbonosas se habría producido la reducción del azufre por actividad biogénica o termoquímica. En el nivel inferior, las firmas isotópicas positivas del azufre sugieren un aporte de azufre magmático por un fluido hidrotermal. Las composiciones isotópicas intermedias entre las dos fuentes de azufre obtenidas en los sulfuros del nivel medio indican mezcla de ambos fluidos.

Los resultados isotópicos obtenidos en sulfuros de Cu tardíos, corresponderían a firmas isotópicas heredadas de sulfuros de metales base previamente formados.

Palabras clave. Mineralización multiepisódica, depósitos polimetálicos, isótopos de S, Macizo Norpatagónico.

Abstract. Loma Galena is one of the eight deposits that constitute the Navidad Project (Ag + Pb Cu + Zn), located southwest of the North Patagonian Massif in Chubut province, Argentina (42°4'S -

68°8'W). The polymetallic mineralization has epithermal characteristics and is hosted in volcanic and sedimentary rocks deposited in a northern depocentre of the continental Jurassic Cañadón Asfalto basin. Sulfides and sulfosalts occur in 3 levels that differ from each other by their styles of mineralization, they are called: lower, middle and upper levels. The $\delta^{34}\text{S}$ isotopic data from pyrite-galena suggest a magmatic sulfur source (+ 4 and 6.7 ‰) in the lower level, a sedimentary source in the upper level (-11.6 ‰) and mixing of both in the middle level (-5.5 and 6.1 ‰). In the upper level, the sedimentary sulfur would have been input by the dissolution of evaporite levels of the Cañadón Asfalto Fm. and in contact with the carbonaceous shales would have produced the reduction of sulfur by biogenic activity or thermochemical processes. In the lower level, positive isotopic signatures of $\delta^{34}\text{S}$ suggest a contribution of magmatic sulfur by hydrothermal fluids. At the middle level, the $\delta^{34}\text{S}$ isotopic compositions with intermediate values between lower and upper levels, indicate mixing between fluids hosted in sedimentary rocks with hydrothermal fluids. Isotopic data from late-stage Cu sulfides, correspond to inheritance values of base metal sulfides previously formed.

Keywords. Multiepisodic mineralization, polymetallic, S isotopes, North Patagonian Massif.

Introducción. Navidad (42°4'S - 68°8'O) es un proyecto minero en etapa de exploración avanzada ubicado en la Cuenca de Cañadón Asfalto, al sudoeste del Macizo Norpatagónico (figura 1A), entre las localidades de Gastre y Gan Gan y sobre la ruta provincial N° 4, provincia de Chubut (figura 1B). Durante el Jurásico temprano, a partir de procesos extensionales relacionados con la apertura del mar de Weddell y fragmentación de Gondwana (Mpodozis y Ramos, 2008) se formó la Cuenca de Cañadón Asfalto. El relleno inicial está representado por sedimentitas y volcanitas jurásicas de las formaciones Las Leoneras y Lonco Trapial, respectivamente (Cúneo *et al.*, 2013). Por encima se encuentra la Formación Cañadón Asfalto que consiste en una secuencia sedimentaria con intercalaciones volcánicas de edad jurásica, depositadas en ambiente lacustre con aporte fluvial. Las sedimentitas de La Fm. Cañadón Asfalto están compuestas por asociaciones de facies carbonáticas (mudstones, wackestones, boundstones -estromatolitos-), evaporíticas y silicoclásticas que registran ciclos de contracción-expansión del cuerpo de agua con una tendencia marcada a la somerización y reducción (Cabaleri *et al.* 2010).

La mineralización polimetálica (Ag+Pb ± Cu, Zn) tiene características epitermales y se hospeda en las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Cañadón Asfalto. Navidad es un depósito inusual, un sistema geotermal fósil que ha sido pre-

servado intacto y que alimentaba con fluidos hidrotermales un lago a través de vetas y vetillas en el sustrato volcánico. Loma Galena, uno de los ocho depósitos que constituyen el Proyecto Navidad, está ubicado en el centro del distrito (figura 1B) y su mayor contenido de sulfuros lo convierte en un depósito clave para estudiar la metalogénesis de Navidad.

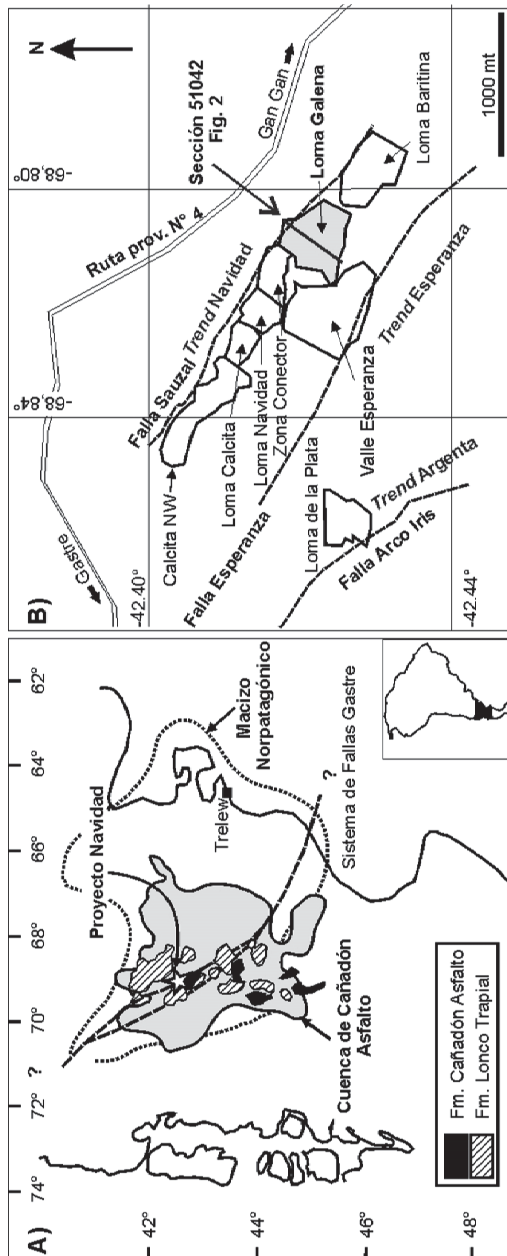


Figura 1. Mapa de ubicación del Proyecto Navidad, de la Cuenca de Cañadón Asfalto y de las Formaciones que la integran.

En esta contribución se analizan datos isotópicos de sulfuros y sulfatos ($\delta^{34}\text{S}$ VCDT ‰) reconocidos en el depósito polimetálico Loma Galena con el fin de establecer las posibles variaciones en las fuentes del azufre en los distintos niveles mineralizados.

Metodología. Para los análisis de isotopos estables, se seleccionaron sulfuros (galena, pirita, calcopirita, covelina, bornita) obtenidos de muestras de testigos corona de perforaciones realizadas por las empresas mineras IMA, Aqualine y Pan American Silver durante las sucesivas etapas de exploración en el proyecto minero. El concentrado de los minerales fue desarrollado en el Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur, a partir de separación mecánica por medio del "hand-picking". Los análisis fueron realizados en el laboratorio de isotopía de SUERC (Scottish Universities Environmental Research Centre), East Kilbride, Escocia, perteneciente a la Universidad de Glasgow.

Resultados. Morfología de la mineralización. En Loma Galena la mineralización polimetálica está hospedada en rocas volcánicas de composición básica a intermedia (figura 2) y en sedimentitas calcáreas que sobreyacen dichas vulcanitas. Los sulfuros y sulfosales yacen en 3 niveles que difieren entre sí por sus estilos de mineralización (figura 2):

– *Nivel inferior.* La mineralización se presenta como parte del relleno multi-episódico de vetas y vetillas brechadas que cortan andesitas frágiles en forma perpendicular o paralela a las líneas de foliación. Estas brechas localmente son heterolíticas con clastos de brecha (textura de brecha en brecha) y clastos de vetillas con textura bandeada costriforme cementados por varias generaciones de minerales hidrotermales. Los sulfuros consisten en pirita, galena, esfalerita, marcasita, con cantidades subordinadas de calcopirita, bornita, tennantita-tetrahedrita, covelina-digenita (figura 3A). Los minerales de ganga son calcita (pre y post mineralización), adularia, baritina, calcedonia y cuarzo.

– *Nivel medio.* La mineralización se presenta como sulfuros semi-masivos que se localizan en la zona de contacto entre las vulcanitas y las rocas sedimentarias que las sobreyacen. En este contacto se concentró gran parte de la actividad hidrotermal y es común la presencia de andesitas autobrechadas afectadas por brechamiento hidrotermal posterior. Este nivel contiene pirita \pm marcasita, galena, esfalerita y sulfuros y sulfosales de Cu con Ag (calcopirita, bornita, tennantita-tetraedrita \pm covelina-digenita) y es la zona más mineralizada del depósito (figura 3B). Dos generaciones de calcita, así como adularia, baritina, calcedonia, siderita y cuarzo constituyen los minerales de ganga.

– *Nivel superior.* Los sulfuros se hospedan en pelitas calcáreas laminadas ricas en materia orgánica, calizas y areniscas arcóscicas. Se encuentran diseminados y también forman bandas mineralizadas paralelas a la laminación, rellenan vetillas discordantes, reemplazan fragmentos calcáreos, restos orgánicos, pisolitos y localmente cementan niveles clásticos gruesos. Esta zona contiene esfalerita y pirita con galena subordinada, carece de minerales portadores de Cu y Ag. Calcita (pre y post mineralización), baritina, calcedonia, cuarzo, siderita, celestina (niveles de exhalita) y yeso son minerales de ganga de este nivel.

Paragénesis Hidrotermal. El diagrama paragenético en Loma Galena consiste en 4 estadios principales separados por eventos de brechamiento con reapertura de vetas y brechas (figura 4). Durante el estadio 1 se formó calcita espática y crustiforme (Cal₁) como relleno de las vetas y vetillas y reemplazó a los fenocristales y a la pasta junto con adularia y albita. La mineralización tuvo lugar durante los siguientes episodios: en el estadio 2 se produjo la mineralización multi-episódica de Fe-Pb-Zn con la formación de pirita framboidal (Py₁) y galena (Gn₁) que luego fueron cubiertos por bandas coloriformes de pirita ± marcasita (Py₂ ± Mcr) (Figs. 3A y B). Luego de un evento de brechamiento, se formaron pirita (Py₃), galena (Gn₂) y esfalerita (Sp₂) sobre las esferulitas fracturadas y fueron cementadas por calcedonia (Chy₁) y baritina (Bar₁). El estadio 3 corresponde a la mineralización de Cu-Ag representada por sulfuros y sulfosales de Cu que reemplazaron a sulfuros previos, precipitaron sulfuros in situ y enriquecieron en Ag a los sulfuros ya formados. Luego de un nuevo brechamiento post-mineralización (estadio 4), precipitaron calcita de grano grueso (Cal₂), calcedonia (Chy₂), baritina (Bar₂), estroncianita y cuarzo.

Isótopos de azufre. Se obtuvieron datos isotópicos de azufre en sulfuros y sulfatos de los 3 niveles mineralizados (n= 23). Los sulfuros analizados del nivel inferior (n= 4) corresponden a 2 estadios: galena (Gn₁) del estadio 2 cuya firma isotópica varía entre $\delta^{34}\text{S} +4,8$ y $+6,7\%$ y calcopirita del estadio 3 (figura 4), con una firma isotópica que varía entre $\delta^{34}\text{S} -0,9$ y $+4\%$. En este nivel, también se obtuvieron valores isotópicos de azufre en baritina correspondiente al estadio post-mineralización (4) con valores variables de $+16\%$ y $+19,7\%$ (figura 5).

En el nivel medio, los análisis isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ en muestras de pirita y galena correspondientes al segundo estadio mineralizador (Py₁, Py₂, Py₃, Gn₁ y Gn₂, Figs.3B y 4) muestran una composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ variable entre $-5,5\%$ y $+6,1\%$ (n=12). Los sulfuros formados durante el tercer estadio (calcopirita, covelina, bornita, Figuras 3B y 4) muestran firmas isotópicas de $\delta^{34}\text{S}$ negativas

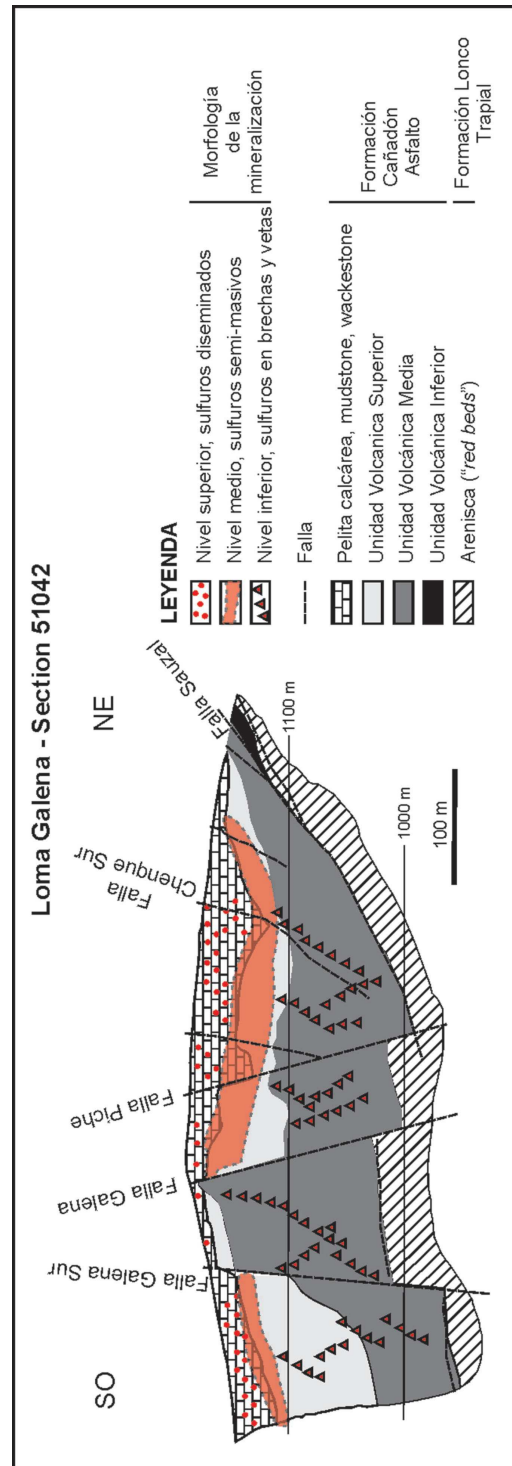


Figura 2. Esquema de los 3 niveles mineralizados en Loma Galena.

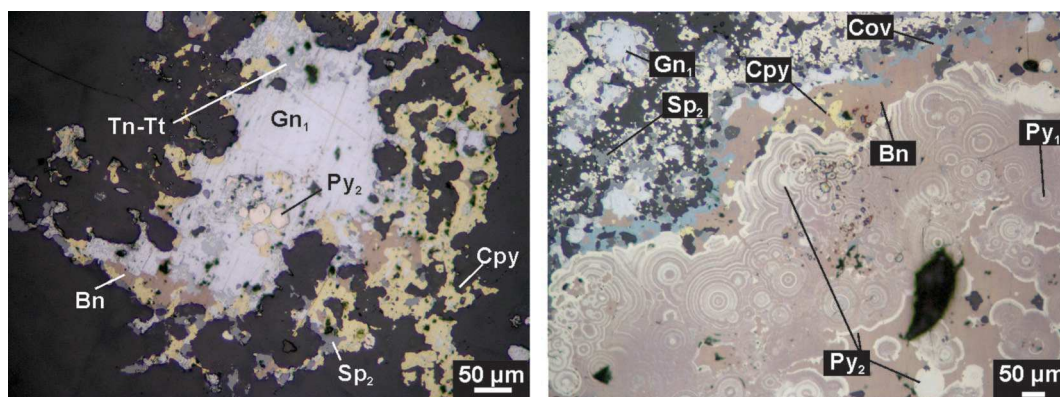


Figura 3. Microfotografías de sulfuros y sulfosales en Loma Galena. A: nivel inferior, B: sulfuros semi-masivos en el nivel medio. Referencias: Py: pirita, Cpy: calcopirita, Tn-Tt: tennantita-tetrahedrita, Bn: bornita, Sp: esfalerita, Cov: covelina, Gn: galena.

(min = -7,4‰) hasta algo positivas (max= +4,9‰; n=4), similares a las composiciones isotópicas de pirita-galena a los cuales reemplazan (figura 5)

Solo se obtuvo un dato isotópico en cristales de galena del nivel superior (estadio 2), con un valor $\delta^{34}\text{S}$ de -11,6 ‰ (figura 5).

Discusión. Los valores isotópicos $\delta^{34}\text{S}$ de pirita-galena del estadio 2 (figura 4) sugieren una fuente magmática del S (+ 4 y 6,7‰) en el nivel inferior, una fuente sedimentaria (-11,6‰) en el nivel superior y una la mezcla de ambas en el nivel medio (-5.5 y 6,1‰, figura 5).

Los niveles evaporíticos de la Formación Cañadón Asfalto pudieron ser fuente del azufre; en ambientes continentales evaporíticos el $\delta^{34}\text{S}$ varía entre +0,9‰ a +7,3‰ (Leybourne *et al.*, 2013). Considerando estos valores, el fraccionamiento isotópico en Loma Galena varía entre -18,3‰ y 0‰. Los mayores fraccionamientos registrados podrían corresponder a reducción biogénica del sulfato generada a partir de bacterias sulfato reductoras (BSR) cuyo rango generalmente varía entre -15‰ y -71‰, aunque también se han registrado fraccionamientos considerablemente menores (-4‰ y -46‰) por BSR (Canfield y Teske 1996). Si bien la actividad micro-

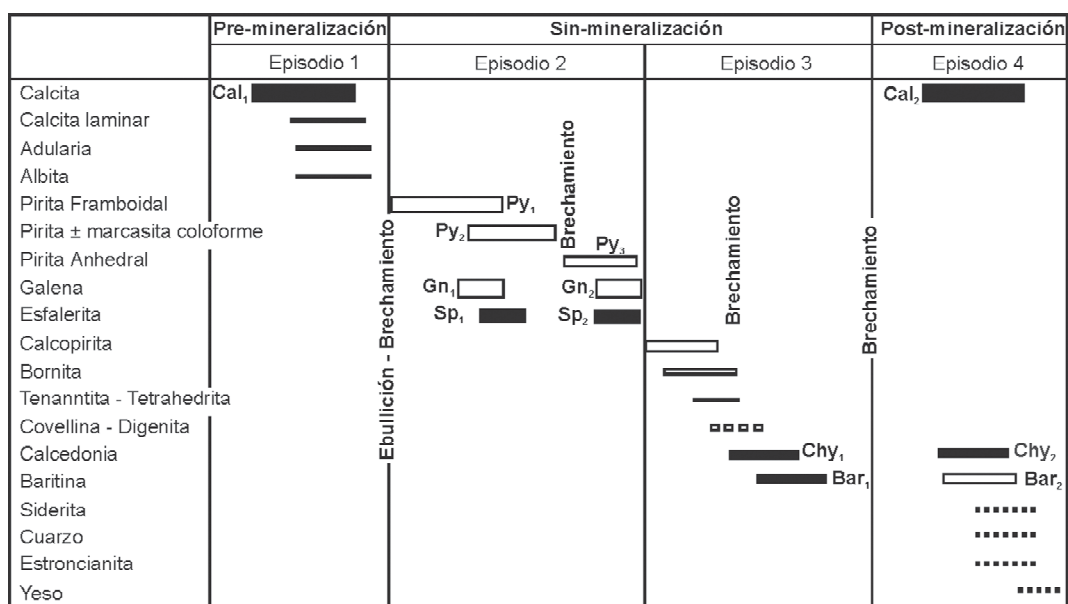


Figura 4. Diagrama paragenético de sulfuros y minerales de ganga en Loma Galena. Las barras de color blanco indican las especies y pulsos que fueron analizados en este trabajo.

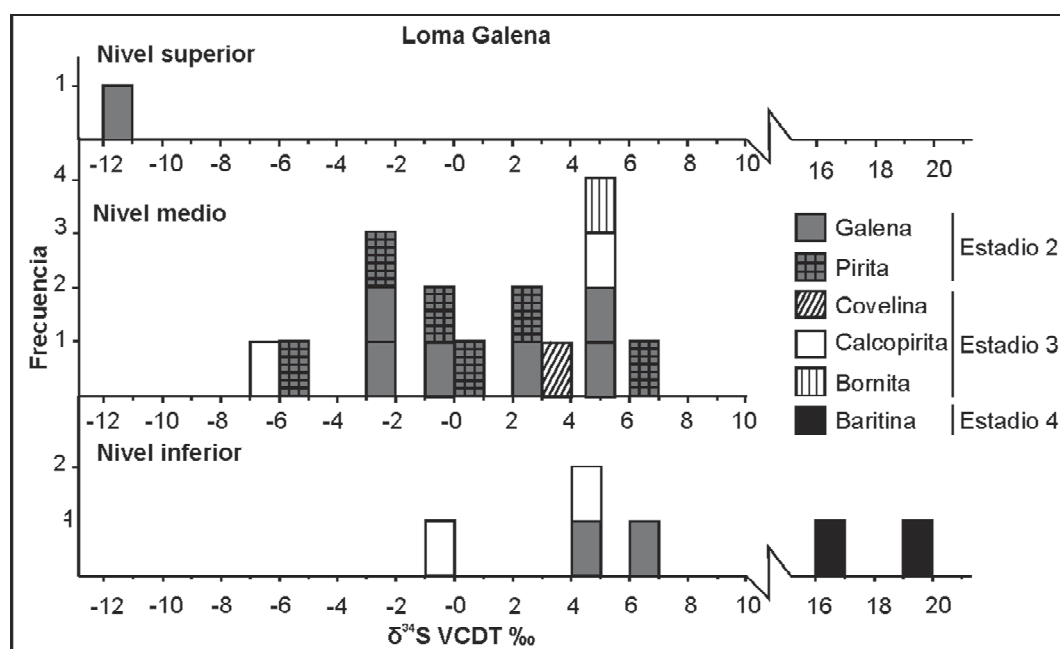


Figura 5. Histograma con las composiciones isotópicas $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfuros y sulfato analizados en los 3 niveles mineralizados en Loma Galena.

bial depende fundamentalmente de la temperatura ($\sim 80^\circ$; Machel *et al.* 1995), en algunos depósitos metalíferos se han registrado significativos gradientes de temperatura a lo largo de distancias muy pequeñas (150°C en mm a cm; Barrie *et al.*, 2009). Estos valores de fraccionamiento también podrían indicar un proceso de reducción termoquímica del sulfato (TSR; $^{34}\text{S}_{\text{SO}_4\text{-sulfuros}} -10\%$ a -20% ; Machel *et al.* 1995).

Los resultados isotópicos obtenidos en los sulfuros de cobre Cu (calcopirita, bornita, covelina) del estadio 3 ($-7,4\%$ a $+4,9\%$; Fig. 5) podrían corresponder a firmas isotópicas heredadas de los sulfuros formados en el estadio 2 (pirita y galena; Fig. 4). La composición isotópica $\delta^{34}\text{S}$ del sulfato acuoso residual fue enriquecida en ^{34}S durante el proceso de reducción (estadios 2 y 3; Ohmoto y Lasaga 1982), favoreciendo la precipitación de baritina ($\delta^{34}\text{S} +16\%$ y $+19,7\%$) en el estadio post-mineralización.

Conclusiones. Las composiciones isotópicas de los sulfuros del depósito Loma Galena evidencian la presencia de dos fuentes de azufre: una magmática y otra sedimentaria. El azufre sedimentario habría sido aportado por la disolución de los niveles evaporíticos de la Fm. Cañadón Asfalto, y en contacto con las pelitas carbonosas del nivel superior, se habría producido la reducción del azufre por actividad biogénica o termoquímica. En el nivel inferior, las firmas isotópicas positivas del azufre sugieren un

aporte de azufre magmático por un fluido hidrotermal. Las composiciones isotópicas intermedias entre las dos fuentes de azufre obtenidas en los sulfuros del nivel medio, confirmarían el proceso de mezcla de fluidos ya documentado en estudios previos (Pratt 2010, Bouhier *et al.* 2013) a partir de evidencias texturales y yacencia de la mineralización. Futuros estudios para obtener temperaturas de formación de la mineralización polimetálica serán necesarios para conocer el mecanismo de reducción del azufre sedimentario.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrie, C.D., Boyce, A. J., Boyle, A. P., Williams, P. J., Blake, K., Wilkinson, J. J., Lowther, M., McDermott, P. y Prior, D. J. 2009. On the growth of colloform textures: a case study of sphalerite from the Galmoy ore body, Ireland. *Journal of the Geological Society* 166 (3): 563-582.
- Bouhier, V., Mas, G. y Franchini, M. 2013. Variedades texturales de pirita en el yacimiento Loma Galena y su relación con la mineralización de Ag-Pb-(Zn-Cu), Proyecto Navidad, Chubut, Argentina. 11° Congreso de Mineralogía y Metalogenia. Actas 177-182. San Juan, Argentina.
- Cabaleri, N., Volkheimer, W., Armella, C., Gallego, O.F., Silva Nieto, D.G., Cagnoni, M.C., Ramos, A.M.; Panarello, H.O.; Paez, M. y Koukharski, M. 2010. Estratigrafía, análisis de facies y paleoambientes de la Formación Cañadón Asfalto.

- to en el depocentro jurásico Cerro Cóndor, provincia del Chubut, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (2): 349–367.
- Canfield, DE. y Teske, A. 1996. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen concentration inferred from phylogenetic and sulfur-isotope studies. *Nature* 382 (6587): 127-132.
- Cúneo, R.; Ramezani, J.; Scasso, R.; Pol, D.; Escapa, I.; Zavattieri, A. y Bowring, S., 2013. High-precision U–Pb geochronology and a new chronostratigraphy for the Cañadón Asfalto Basin, Chubut, central Patagonia: Implications for terrestrial faunal and floral evolution in Jurassic. Amsterdam, The Netherlands. *Gondwana Researches* 24 (3): 1267-1275.
- Leybourne, M. I., Cameron, E. M., Reich, M., Palacios, C., Faure, K. y Johannesson, K. H. 2013. Stable isotopic composition of soil calcite (O, C) and gypsum (S) overlying Cu deposits in the Atacama Desert, Chile: Implications for mineral exploration, salt sources, and paleoenvironmental reconstruction. *Applied geochemistry* 29: 55-72.
- Machel, H. G., Krouse, H. R. y Sassen, R. 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied geochemistry* 10 (4), 373-389
- Mpodozis, C. y Ramos, V. 2008. Tectónica jurásica en argentina y chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones? *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (4) 481-497.
- Ohmoto, H. y Lasaga, A. C. 1982. Kinetics of reactions between aqueous sulfates and sulfides in hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46 (10), 1727-1745.
- Pratt, W. 2010. Silver mineralization at Loma Galeña, Navidad. Informe Privado, Pan American Silver. Vargas-González, C. 2010. Procesamiento de Imágenes de Satélite & GIS. Remote Sensing Geoimage. www.rs-geoimage.com.