

FIRMAS DE REE EN INTRUSIVOS ASOCIADOS A PÓRFIDOS DE COBRE EN SONORA

CECILIA SANTILLANA-VILLA¹, MARTÍN VALENCIA-MORENO², LUCAS OCHOA-LANDÍN³,
RAFAEL DEL RÍO-SALAS².

RESUMEN

Las firmas de REE en muestras de rocas plutónicas de cinco sistemas de pórfido de cobre en Sonora, sugieren que existe un proceso petrogenético a partir del enfriamiento de un plutón principal que genera columnas de magma de textura porfídica, emplazada en niveles más someros de la corteza. Esto es revelado por una aparente inversión en la polaridad de la anomalía de europio en los patrones normalizados de REE. En general, los patrones muestran una pendiente enriquecida en LREE, con una anomalía negativa de europio bien desarrollada en el caso del plutón principal. Las firmas de los intrusivos asociados con la mineralización son muy similares, a excepción de que la anomalía de europio se hace menos negativa e incluso positiva. De acuerdo con los modelos existentes, esto puede explicarse considerando que hay un fraccionamiento importante de hornblenda durante la generación del stock porfídico, tal vez en condiciones magmáticas más reductoras.

Palabras clave: pórfidos de cobre, REE, anomalía de europio

¹Estudiante de posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, Sonora, México, cecilia.santillanav@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0816-5892>

²Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, Sonora, México. martin.valencia@unam.mx, rdelriosalas@gmail.com.

³Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. Lucaso.geologia@gmail.com

Autor de Correspondencia: Cecilia Santillana Villa cecilia.santillanav@gmail.com

Recibido: 18 / 10 / 2021

Aceptado: 24 / 03 / 2022

Publicado: 01 / 04 / 2022

Cómo citar este artículo:

Santillana Villa, C., Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., & Del Río-Salas, R. (2022). Firmas de REE en intrusivos asociados a pórfidos de cobre en Sonora. *EPISTEMUS*, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.188>

REE SIGNATURES OF INTRUSIVES ASSOCIATED WITH PORPHYRY COPPER OF SONORA

ABSTRACT

REE signatures in samples of plutonic rocks from five copper porphyry systems in Sonora, suggest that there is a petrogenetic process linked to the cooling of a major pluton that generates magma columns of porphyritic texture, which are emplaced at shallow levels in the crust. This is revealed by an apparent reversal in the polarity of the europium anomaly in the REE normalized patterns. In general, the patterns display a LREE-enriched slope, with a well-developed negative europium anomaly in the case of the main pluton. The signatures of the intrusives associated with mineralization are very similar, excepting the europium anomaly, which becomes less negative and even positive. According to existing models, this can be explained by considering that there is a significant fractionation of hornblende during the generation of the porphyritic stock, perhaps under more reducing magmatic conditions.

Key words: Copper porphyry, REE, europium anomaly

Introducción

Los depósitos del tipo pórfido de cobre son la principal fuente de cobre en el mundo [1]. Estos yacimientos son comunes en todo el mundo, pero tienen una importancia particular en las cordilleras occidentales de Norteamérica y Sudamérica. En Norteamérica, se localizan a lo largo de un cinturón que se extiende desde Alaska hasta el sur de México, siendo particularmente importantes en la región entre los estados de Arizona y New Mexico, en el suroeste de Estados Unidos, y en el estado de Sonora, en el noroeste de México. Esta región concentra la mayor parte del cobre de este tipo en una zona que se ha denominado el Gran Clúster de los pórfidos de cobre de Norteamérica. El emplazamiento de estos depósitos inició desde el período Triásico, con la activación de la subducción de la placa oceánica Farallón debajo de la placa de Norteamérica, y continuaron formándose en el Mesozoico y gran parte del Cenozoico [2], aunque los más importantes se emplazaron durante el Cretácico Tardío y el Eoceno [3].

Los yacimientos de pórfidos de cobre son sistemas magmático-hidrotermales emplazados en ambientes sub-volcánicos asociados a zonas de subducción (Figura 1). El origen de estos pórfidos mineralizados está ligado a la evolución de plutones de composición calcoalcalina [1], [3] emplazados a niveles mesozonales de la corteza, a ~8-12 km de profundidad [5], [6]. A partir del enfriamiento de estos cuerpos se desarrollaron columnas de magma relativamente delgadas (~2 km), de textura porfídica, que se emplazaron en niveles subvolcánicos (~1-3 km) [4],[8]. La composición de los plutones porfídicos varía entre cuarzodioritas y granitos [6], [7], los cuales generalmente presentan más de una fase en un mismo sistema; y no todos ellos mineralizan.

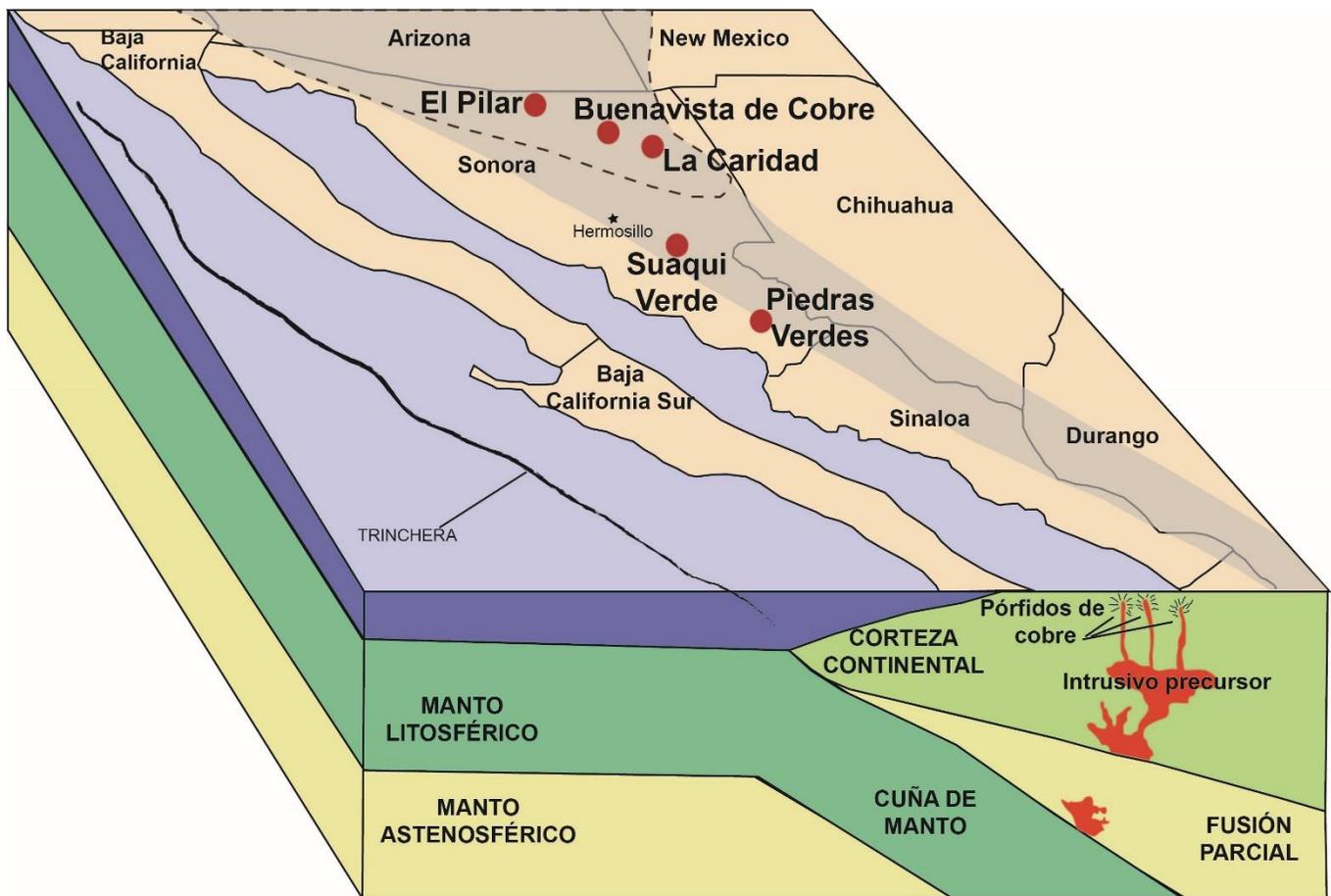


Figura 1. Modelo esquemático de la formación de pórfidos de cobre a partir de un proceso de subducción, en la región del noroeste de México. En rojo se indican los pórfidos de cobre considerados para este trabajo. La línea punteada indica el límite sur del Gran clúster de pórfidos de cobre de Norteamérica. (adaptado de Valencia-Moreno [9]).

Actualmente resulta muy difícil discernir entre un plutón porfídico productivo y uno no productivo de mineralización basado en las características geológicas y geoquímicas. Sin embargo, existe un aparente indicador en las concentraciones de los elementos del grupo de las tierras raras (REE). Nuestras observaciones indican una aparente reducción e incluso una inversión en la polaridad de la anomalía de europio observada en los patrones de REE, partiendo un patrón enriquecido en las REE ligeras (LREE) y una anomalía negativa claramente desarrollada en el plutón principal. La causa específica de este comportamiento es desconocida; sin embargo, Lang

y Titley [10], realizaron un estudio en varios pórfidos de cobre de Arizona, mediante el cual observaron un cambio en las anomalías de europio, con una firma más positiva en los plutones porfídicos, propusieron que esta característica está ligada a un proceso magmático que ocurrió en equilibrio con la hornblenda. Tomando lo anterior, en este estudio se realizó un análisis geoquímico en cinco depósitos de Sonora con mineralización del tipo pórfido de cobre, poniendo énfasis en la composición de las REE, para evaluar si el comportamiento de las mismas es similar a lo observado en Arizona.

SITIOS DE ESTUDIO

En Sonora se han documentado 27 localidades de pórfido de cobre, de las cuales El Pilar, Buenavista del Cobre, La Caridad, Suaqui Verde y Piedras Verdes fueron seleccionados para este estudio, cuyas características particulares se describen a continuación.

El Pilar

El prospecto El Pilar se encuentra ubicado a 45 km al noroeste de la ciudad de Cananea, en el municipio de Santa Cruz. Este prospecto se encuentra en etapa de exploración por parte del corporativo Grupo México, y contiene reservas estimadas en ~325 Mt de cobre con una ley promedio de 0.287% Cu [11]. El sistema está relacionado al emplazamiento de un plutón de composición granodiorítica, el cual fue fechado por U-Pb en zircones en 74.7 ± 1.1 y 74.6 ± 1.4 Ma [12]. La mineralización está asociada al emplazamiento de un pórfido cuarzofeldespático dominado por fenocristales de ortoclasa y cuarzo.

Buenavista del cobre

La mina Buenavista del Cobre, la mayor en México y una de las más importantes en Norteamérica, se encuentra a 1 km al oeste-suroeste de la ciudad de Cananea. Este depósito cuenta con

recursos estimados en ~7140 Mt, con leyes de 0.42% Cu y 0.008% Mo [13]. La mineralización está alojada principalmente en rocas volcánicas de las Formaciones Henrietta y Mesa, y está asociada al emplazamiento de intrusivos porfídicos generados durante el enfriamiento de la granodiorita Cuitaca. La edad determinada para esta granodiorita fue de 64 Ma, por U-Pb en zircones. La mineralización del depósito está centrada en un pórfido cuarzofeldespático, la cual fue fechada por Re-Os en molibdenita en $59.2-59.3 \pm 0.3$ Ma [12].

La Caridad

La mina La Caridad se ubica a unos 14 km al sureste de Nacozari, siendo la segunda en importancia en México; cuenta con recursos estimados en ~1800 Mt, con leyes de 0.452% de Cu y 0.0247% de Mo [13]. La mineralización se aloja principalmente en rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, asociada a la intrusión de una granodiorita fechada por U-Pb en zircones en 55.5 ± 1.9 y 55.6 ± 1.7 Ma [14]. La mineralización está asociada al emplazamiento de un cuerpo porfídico de composición cuarzomonzonítica, cuya edad ha sido determinada por Re-Os en molibdenita en 54.3 ± 1.7 Ma [14].

Suaqui Verde

El prospecto Suaqui Verde se encuentra a unos 5 km al noreste del poblado de Suaqui Grande, en Sonora central. Este prospecto tiene un tamaño estimado en ~87.2 Mt, con una ley de 0.43% de Cu [13]. El depósito está alojado principalmente en rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, y está asociada al emplazamiento de un plutón granodiorítico, con edades K-Ar en hornblenda y biotita de 58.8 ± 1.3 y 56.4 ± 1.2 Ma, respectivamente [1]. La mineralización deriva del emplazamiento de un intrusivo porfídico cuarzofeldespático, fechado por Re-Os en molibdenita en 57 ± 0.3 Ma [15].

Piedras Verdes

La mina Piedras Verdes se localiza a unos 10 km al noroeste de Álamos, y contiene recursos estimados en ~452.79 Mt con una ley de 0.28% Cu [16]. El depósito está emplazado en rocas sedimentarias de cuenca marina profunda de edades de la Era Paleozoica, las cuales son intrusionadas por una granodiorita de edad K-Ar en biotita de 67.3 ± 1.4 Ma [1]. La mineralización está asociada al emplazamiento de un pórfido cuarzofeldespático fechado por KAr en biotita en 62.2 ± 1.6 Ma [17].

METODOLOGÍA

En cada sitio de estudio se colectaron 2 muestras, una del intrusivo principal y una muestra del plutón porfídico asociado con la mineralización. Las muestras se colectaron de afloramientos o de núcleos de barrenación, tratando de colectar la roca con la mejor preservación posible. Las muestras se prepararon en las instalaciones de la Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM en Hermosillo, Sonora (ERNO), para su posterior análisis por XRF en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía de la UNAM en la Ciudad de México, y por ICP-MS en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM en Juriquilla, Querétaro.

RESULTADOS

Las concentraciones de elementos mayores obtenidos por XRF se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Concentración de óxidos de elementos Mayores (wt%) y algunos traza (ppm) medidos por XRF, indicando el índice de alcalinidad (A/CNK); los valores de número de magnesio (Mg#) y de algunos minerales fueron calculados de acuerdo con la norma CIPW.

	Plutones precursores					Plutones porfídicos						
	PMX-1828	PMX-1837	LC-1	PMX-1802	PV-04	PMX-1829	Fsp ¹	CN-1	PMX1818	LC-2	SV-006	PV-03
SiO ₂	64.73	66.72	67.46	64.38	63.05	70.35	65.70	68.75	68.16	69.59	65.86	67.37
TiO ₂	0.61	0.54	0.55	0.65	0.73	0.23	0.31	0.40	0.47	0.39	0.48	0.49
Al ₂ O ₃	15.73	16.31	15.18	16.41	16.51	14.59	16.70	15.62	15.78	15.75	14.97	15.08
Fe ₂ O ₃	4.38	3.37	3.93	4.74	5.38	1.90	2.11	3.31	3.19	3.81	4.56	3.52
MnO	0.05	0.05	0.05	0.11	0.09	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.06	0.02
MgO	1.70	1.14	1.60	1.94	2.39	0.46	0.63	0.78	1.00	1.42	1.72	1.74
CaO	3.38	3.71	3.03	4.50	5.04	1.06	0.23	0.12	2.74	0.06	2.84	3.09
Na ₂ O	4.25	4.12	3.50	3.20	3.31	3.61	0.22	0.15	4.01	0.16	1.72	3.30
K ₂ O	3.57	3.40	3.88	3.15	2.66	5.86	5.25	7.07	3.70	5.12	3.55	2.73
P ₂ O ₅	0.19	0.21	0.15	0.16	0.18	0.07	0.14	0.07	0.16	0.14	0.12	0.15
LOI	1.42	0.44	0.58	0.77	0.67	1.84	8.65	3.60	0.76	3.08	4.14	2.51
Total	100.00	100.00	99.90	100.00	100.00	100.00	99.98	99.88	100.00	99.55	100.00	100.00
A/CNK	0.92	0.95	0.98	0.97	0.94	1.03	2.58	1.92	1.01	2.66	1.27	1.08
Mg#	37.48	34.29	38.56	38.77	40.67	27.01	31.59	26.60	32.52	36.51	36.78	43.37
Rb	102	138	210	147	107	215	300	357	175	423	121	108
Sr	689	582	364	478	448	168	130	52	474	18	299	450
Ba	1170	908	871	812	928	1009	1700	920	861	434	761	598
Y	20	23	40	23	20	33	<10	46	23	59	22	24
Zr	187	173	198	130	180	148	170	156	187	151	108	163
Nb	6	5	12	7	9	11	20	8	6	11	7	6
V	80	56	75	96	104	21	N.D.	40	55	47	64	60
Cr	22	331	10	303	27	34	N.D.	<2	393	<2	19	61
Co	11	8	8	13	16	8	N.D.	6	7	5	7	10
Ni	22	12	9	18	14	9	<1	4	14	3	43	15
Cu	17	18	515	31	20	192	529	90	52	810	172	227
Zn	21	28	87	110	71	<2	N.D.	41	40	67	58	15
Th	9	12	35	13	14	14	N.D.	10	16	17	15	7
Pb	10	12	12	10	11	11	N.D.	29	11	35	12	14
CIPW calculado en minerales diagnósticos												
Qz	20.98	21.89	31.65	23.73	21.59	35.02	44.69	41.11	23.96	48.35	49.71	37.10
Pg	42.51	49.11	25.75	43.49	47.60	17.79	0.00	1.54	46.83	N.D.	0.00	25.06
Or	21.10	20.09	22.52	18.62	15.72	34.63	31.03	43.38	22.04	30.61	20.98	16.13
C	2.47	0.63	5.78	1.72	1.01	4.79	11.03	7.94	0.58	10.30	11.13	7.25
Hy	4.23	2.84	3.91	4.83	5.95	1.12	1.57	1.99	2.49	3.56	4.28	4.33
Ilm	0.11	0.11	0.11	0.24	0.19	0.06	0.06	0.04	0.09	0.06	0.13	0.04
He	4.38	3.37	3.68	4.74	5.38	1.90	2.11	3.43	3.22	3.85	4.56	3.52
Ap	0.44	0.49	0.35	0.37	0.42	0.14	0.32	0.16	0.37	0.32	0.28	0.35

NOTA: LOI: Perdida por encendido. A/CNK: Relaciones de álcalis basadas en las proporciones molares de Al₂O₃/CaO+Na₂O+K₂O). Mg#: índice de magnesio calculado a partir de 100 veces la relación molar de MgO/(MgO+FeO). ¹Datos de Wodzicki [18]. Patrones y curvas de calibración dados en Lozano y Bernal [19]. N.D.: Sin datos.

El contenido de SiO₂ varía entre ~63.05 y 70.35% con una media de 66.84%. Los elementos mayores muestran tendencias negativas en relación a la variación de sílice, a excepción del K₂O, que muestra una distribución positiva, y el Na₂O que tiene una distribución más enriquecida hacia los valores medios del rango de sílice.



En la mayoría de los casos, las muestras de los intrusivos precusores y de los plutones porfídicos estudiados, tienen una composición muy similar a los plutones asociados a los sistemas de pórfido de cobre en Arizona, en particular los intrusivos porfídicos. La concentración de algunos elementos traza, incluyendo el grupo de las tierras raras (REE) se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Concentración de elementos traza y tierras raras en ppm para las rocas colectadas en los distintos sitios con mineralización tipo pórfido de cobre estudiados en Sonora.

	Plutones precusores					Plutones porfídicos						
	PMX-1828	PMX-1837	LC-1	PMX-1802	PV-04	PMX-1829	Fsp ¹	CN-1	PMX1818	LC-2	SV-006	PV-03
La	30.02	29.52	34.24	23.65	28.27	27.60	24.87	30.22	35.62	14.59	23.61	25.20
Ce	54.23	58.84	70.41	48.27	55.21	49.77	53.97	55.61	59.59	30.96	43.29	48.72
Pr	6.94	7.26	7.99	5.99	6.83	5.59	N.D.	6.27	6.26	3.32	4.91	5.89
Nd	25.31	26.64	29.96	22.68	25.51	18.29	16.74	23.86	21.37	12.26	17.41	21.79
Sm	4.50	4.84	5.81	4.45	5.15	3.07	3.15	4.42	3.50	2.38	3.17	4.10
Eu	1.23	1.19	1.42	1.12	1.17	0.71	1.45	1.65	0.93	0.83	0.88	1.08
Gd	3.42	3.77	4.69	3.69	4.60	2.43	2.51	3.31	2.75	2.08	2.71	3.37
Tb	0.44	0.51	0.68	0.51	0.68	0.36	0.33	0.40	0.36	0.31	0.39	0.47
Dy	2.10	2.54	4.18	2.63	3.95	1.97	1.39	2.09	1.77	1.84	2.05	2.47
Ho	0.38	0.47	0.86	0.48	0.77	0.40	0.24	0.37	0.34	0.39	0.39	0.47
Er	0.98	1.25	2.12	1.25	2.12	1.18	0.67	0.84	0.92	0.83	1.05	1.25
Tm	N.D.	N.D.	0.31	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.12	N.D.	0.13	N.D.	N.D.
Yb	0.93	1.18	2.26	1.16	2.05	1.35	0.74	0.83	0.91	0.78	1.05	1.19
Lu	0.15	0.18	0.36	0.18	0.31	0.22	0.16	0.14	0.15	0.14	0.16	0.18
ΣREE	130.62	138.18	165.29	116.06	136.61	112.94	106.22	130.12	134.47	70.86	101.06	116.19
Eu/Eu*	0.96	0.85	0.83	0.85	0.73	0.79	1.58	1.32	0.91	1.14	0.91	0.89
Ce _N /Yb _N	16.17	13.89	8.65	11.55	7.49	10.22	20.26	18.60	18.25	11.00	11.47	11.38
Cs	2.97	3.45	N.D.	9.31	5.07	6.39	30.41	17.12	6.37	N.D.	8.47	5.11
Rb	96.79	118.09	210.00	149.92	102.49	219.25	472.44	399.89	175.00	423.00	125.13	113.92
Sr	670.25	546.40	364.00	471.76	431.21	162.93	6.16	46.63	474.00	18.00	327.00	467.80
Ba	1267.52	955.62	871.00	866.55	966.46	1170.54	243.24	1037.31	861.00	434.00	831.66	674.86
Zr	170.99	146.57	198.00	180.18	196.88	165.16	15.18	173.44	187.00	151.00	61.22	155.16
U	4.41	3.88	N.D.	4.05	2.16	2.98	N.D.	4.86	5.17	N.D.	9.92	2.46
Th	7.58	10.06	35.00	12.74	10.50	9.34	N.D.	10.49	16.00	17.00	15.66	6.04
Ta	0.89	0.83	N.D.	0.81	0.89	0.89	N.D.	0.66	0.77	N.D.	0.81	0.64
Hf	4.48	3.90	N.D.	4.70	5.08	4.56	N.D.	4.46	3.89	N.D.	1.93	4.01
Nb	11.29	9.95	12.00	9.58	10.70	11.97	20.00	9.12	6.00	11.00	7.53	8.43

Concentraciones de elementos obtenidas por ICP-MS, con excepción de las muestras LC-1 y LC-2, que fueron medidas por XRF.¹Datos de Wodzicki [18]. El subíndice "N" indica valores normalizados de condrita de acuerdo con los valores de McDonough y Sun [20]. Eu/Eu*= EuN/(SmNxGdN)^{1/2}. Ce_N/Yb_N=pendiente REE. Estándares utilizados y curvas de calibración dadas en Mori et al [21]. N.D.: Sin datos.

Las abundancias totales de REE varían de entre 116 y 165 ppm para las muestras de los plutones precusores, y entre 70 y 134 ppm, con promedios de 137 y 110, respectivamente. La pendiente

de los patrones de REE normalizadas a la condrita (REEN), dado por las relaciones CeN/YbN , son entre 7.5 y 16.2 con un promedio de 11.5 para los plutones precusores, y entre 10.2 y 20.2, con un promedio de 14.4 para los plutones porfídicos. En cuanto a la anomalía de europio (Eu/Eu^*), los valores de los intrusivos precusores son entre 0.73 y 0.96, con un promedio de 0.85, y entre 0.79 y 1.58 con un promedio de 1.08 para los pórfidos. Estos valores obtenidos de las concentraciones de REE sugieren que existe una clara menor concentración en las muestras de los intrusivos porfídicos, acoplados a patrones normalizados con pendientes y anomalías de europio relativamente mayores, con tres de las siete muestras estudiadas indicando anomalías positivas (Figura 2).

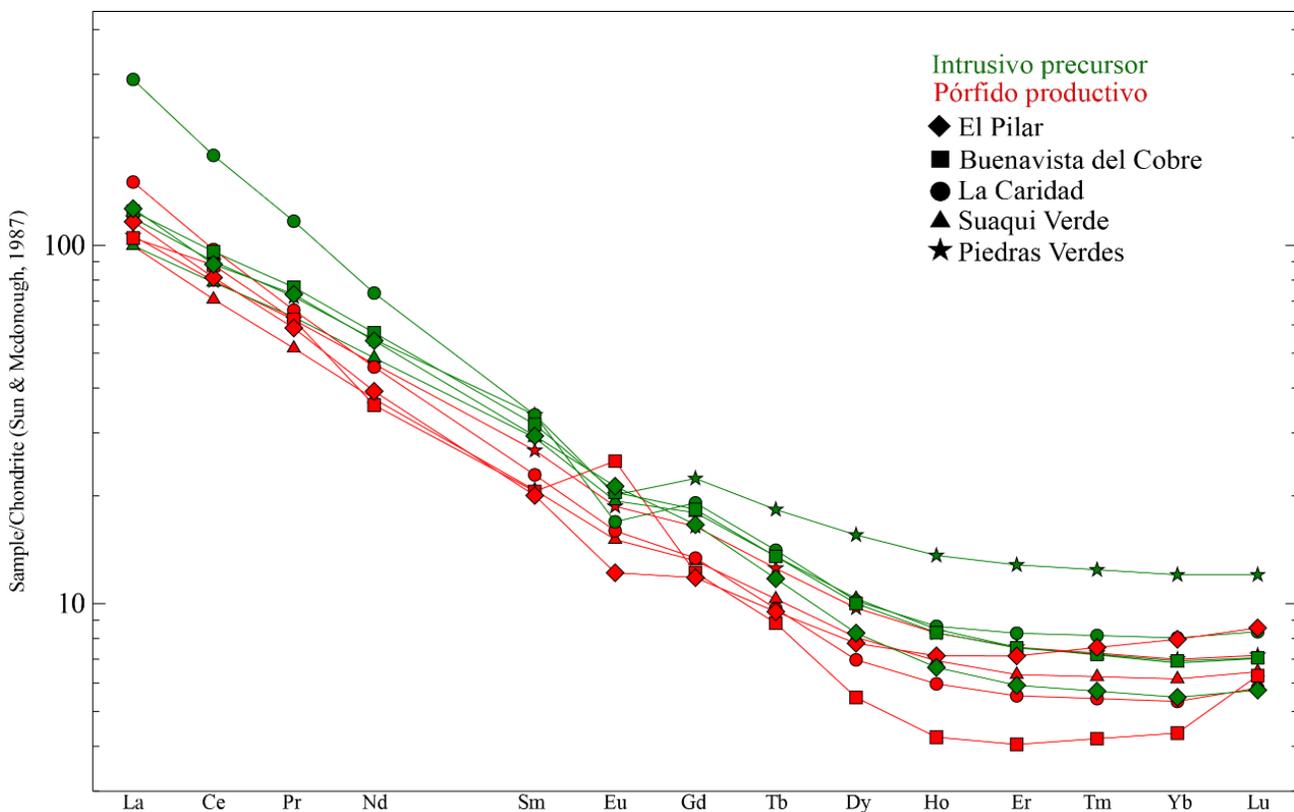


Figura 2. Diagrama de los patrones de REE normalizados a los valores condriticos propuestos por Sun y McDonough [20].

Haciendo un análisis de los patrones de tierras raras normalizados a la condrita (REEN) se observa un claro mayor enriquecimiento en las muestras de los plutones precursores combinado con el desarrollo de anomalías positivas en el caso de los plutones porfídicos.

CONCLUSIÓN

Los resultados de los datos geocronológicos y geoquímicos en muestras de los intrusivos precursores y de los plutones porfídicos en El Pilar, Buenavista del Cobre, La Caridad, Suaqui Verde y Piedras Verdes, indican una gran afinidad temporal y composicional entre ellos. Los patrones de tierras raras normalizados a la condrita indican que los plutones porfídicos fueron extraídos a partir del plutón principal en enfriamiento, probablemente en equilibrio con hornblenda, clinopiroxeno y esfena, cuyo fraccionamiento causó una inversión de la anomalía de Eu a posiciones menos negativas e incluso positivas en los espectros. Además de esto, el fraccionamiento de estas fases minerales está evidenciado por una disminución en el total de tierras raras, así como por una mayor concavidad en el segmento de las tierras raras pesadas (HREE).

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo otorgado por CONACyT (beca 624575) y al proyecto PERUMEX (UNAM-Grupo México, convenio No. 49647-2463-25-IX-17). Extendemos el agradecimiento al personal que nos dio acceso a los sitios de estudio, así como a R. Lozano-Santa Cruz por su colaboración en la obtención de los análisis por XRF (LANGEM), a O. Pérez-Arvizu por su apoyo en los análisis de ICP-MS (CGEO-LEI) y A. Orcí-Romero por su trabajo en la preparación de las láminas delgadas

Referencias

- [1] Sillitoe, R. H., "Porphyry Copper Systems", *Economic Geology* 105, p. 3–41, 2010. DOI:10.2113/gsecongeo.105.1.3
- [2] Damon, P. E., Shafiqullah, M. and Clark K. F., "Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of México", *Canadian Journal of Earth Sciences* 20, p. 1052-1071, 1983. DOI:10.1139/e83-095
- [3] Valencia-Moreno, M., Camprubí, A., Ochoa-Landín, L., Calmus T. and Mendivil-Quijada, H., "Latest Cretaceous-early Paleogene "boom" of porphyry Cu mineralization associated with the Laramide magmatic arc of México", *Ore Geology Reviews* 81, p. 1113–1124, 2017. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.05.005
- [4] Damon, P.E., Shafiqullah, M. and Clark, K.F., "Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis", *Revista del Instituto de Geología* 5, p. 223–238, 1981.
- [5] Richards, J. P., "Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation", *Economic Geology* 98 (8), p. 1515-1533, 2003. DOI:10.2113/98.8.1515
- [6] Berger, B.R., Ayuso, R.A., Wynn, J.C. and Seal, R.R., "Preliminary model of porphyry copper deposits", *Geological Survey of U.S.A., Open File Report 2008–1321*, p. 55, 2008.
- [7] Titley, S., "Porphyry Copper Deposits of the American Cordillera", *Arizona Geological Digest* 20, p. 6-20, 1995.
- [8] Sillitoe, R. H., "The tops and bottoms of porphyry copper deposits", *Economic Geology* 68, p. 799–815, 1973. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.68.6.799>
- [9] Valencia-Moreno, M., "Los batolitos de Sonora", *Investigación y ciencia*, 2007.
- [10] Lang, J.R., and Titley, S.R., "Isotopic and geochemical characteristics of Laramide magmatic systems in Arizona and implications for the genesis of porphyry copper deposits", *Economic Geology* 93, p. 138–170, 1998. DOI:10.2113/GSECONGEO.93.2.138
- [11] Grupo México S.A.B. de C.V., "Informe de resultados tercer trimestre 2019", *Información de lared*, https://www.gmexico.com/images/documentos/reportes_financieros/NP_GMEXICO_3T19_VERSION_FINAL.pdf, 2019.
- [12] Del Rio-Salas, R., Ochoa-Landín, L., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., Meza-Figueroa, D., Salgado-Souto, S., Kirk, J. Ruíz, J. and Mendivil-Quijada, H., "New U-Pb geochronology of Laramide porphyry copper mineralization along the Cananea lineament, northeastern Sonora, México: Contribution to the understanding of the Cananea copper district", *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 1125-1136, 2017. DOI:10.1016/j.oregeorev.2015.11.029
- [13] Singer, D. A., Berger, V. and Moring, B. C., "Porphyry Copper Deposits of the World: Database and Grade and Tonnage Models", *U. S. Geological Survey, Open-File Reports 2008-1155*, 2008.
- [14] Valencia, V., Noguez-Alcántara, B., Barra, F., Ruiz, J., Gehrels, G., Quintanar, F. and Valencia-Moreno, M., "U–Pb zircon and Re–Os molybdenite geochronology from La Caridad porphyry copper deposit: insights for the duration of magmatism and mineralization in the Nacozari District, Sonora, México", *Mineralium Deposits* 40, p. 175-191, 2005. DOI:10.1007/s00126-005- 0480-1.
- [15] Barra, F., Ruiz, J., Valencia, V.A., Ochoa-Landín, L., Chesley, J.T. and Zürcher, L., "Laramide porphyry Cu-Mo mineralization in northern México: age constraints from Re-Os geochronology in molybdenite", *Economic Geology* 100, p. 1605-1616, 2005. DOI:10.2113/gsecongeo.100.8.1605.
- [16] Cobre del Mayo S.A. de C.V., "Technical Report", p. 2, 2015.
- [17] Espinosa-Perea, V., "Magmatic evolution and geochemistry of the Piedras Verdes deposit, Sonora, México", M. C. Tesis. The University of Arizona, p. 114, 1999. [18] Wodzicki, W.A., "The evolution of magmatism and mineralization in the Cananea district, Sonora, México", *Economic Geology Special Publication* 8, p. 243-263, 2001.
- [19] Lozano, R., and Bernal, J. P., "Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22 (3), p. 329-344, 2005.





[20] Sun, S. S. and McDonough W. F., "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes", Geological Society, London, Special publications 42, p. 313-345, 1989. DOI:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

[21] Mori, L. A., Gómez-Tuena, Y., and Goldstein, C. S., "Effects of prolonged flat subduction on the Miocene magmatic record of the central Trans-Mexican Volcanic Belt", Chemical Geology 244, p. 452-473, 2007.

Cómo citar este artículo:

Santillana Villa, C., Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., & Del Río-Salas, R. (2022). Firmas de REE en intrusivos asociados a pórfidos de cobre en Sonora. EPISTEMUS, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.188>

