

## Geología y geoquímica del pórfido cuprífero Los Alisos, distrito minero de La Caridad, Sonora, México

**Mario Arturo Rascón-Heimpel<sup>1,2</sup>, Martín Valencia-Moreno<sup>3,\*</sup>,  
Lucas Ochoa-Landín<sup>4</sup> y Thierry Calmus<sup>3,5</sup>**

<sup>1</sup> Mexicana de Cobre, S.A. de C.V., Blvd. García Morales Km 8.5,  
Col. La Manga, 83220 Hermosillo, Sonora, México.

<sup>2</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Hermosillo,  
Hermosillo Sonora, México.

<sup>3</sup> Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México,  
L.D. Colosio S/N y Madrid, Hermosillo, Sonora, 83240 México.

<sup>4</sup> Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Blvd. Rosales y L.D. Colosio,  
83000 Hermosillo, Sonora, México.

<sup>5</sup> ISTerre, Grenoble, France-BP 53, 38041 Grenoble CEDEX 9, Francia.

\* valencia@geologia.unam.mx

### RESUMEN

*El prospecto minero Los Alisos es un depósito de tipo pórfido de cobre localizado en el noreste del estado de Sonora, a unos 10 km al noreste de la mina La Caridad. Es un depósito relativamente pequeño, caracterizado por una zona de intensa oxidación hipogénica de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>. De acuerdo con las nuevas edades U-Pb en zircones reportadas en este trabajo, las rocas más antiguas que afloran en esta región corresponden a una secuencia volcánica andesítica del Cretácico Tardío, fechadas en  $73.6 \pm 1.0$  Ma, las cuales fueron intrusionadas durante el Paleoceno por un pórfido cuarzo-feldespático de  $60.2 \pm 0.8$  Ma. Estas rocas fueron cubiertas de manera discordante por lavas y tobas riolíticas del Eoceno-Oligoceno, y posteriormente por una secuencia de relleno de valles caracterizada por conglomerados y areniscas, con flujos ocasionales de basalto, la cual se correlaciona de manera regional con la Formación Báucarit del Mioceno. La composición geoquímica e isotópica del pórfido cuarzo-feldespático está caracterizada por un patrón enriquecido en tierras raras ligeras (LREE) y valores iniciales de Sr y  $\epsilon$ Nd de 0.7067 y -5.5, respectivamente. Esto es consistente con la composición de las rocas intrusivas del cinturón Larámide que fueron emplazadas en el suroeste de E.U.A. y el noroeste de México, en la región subyacente por las rocas proterozoicas del basamento norteamericano. El área de estudio es estructuralmente compleja, especialmente debido a los efectos de la extensión regional asociada al desarrollo de la provincia Basin and Range. Como resultado de este evento extensivo, el depósito de Los Alisos quedó ubicado en un bloque levantado delimitado por dos fallas normales con orientación NNW, que ponen en contacto discordante a la secuencia volcánica laramídica con las lavas riolíticas del Eoceno-Oligoceno y las rocas miocénicas de la Formación Báucarit. A diferencia del gran bloque mineralizado de La Caridad, donde la exhumación expuso la zona de sulfuros hipogénicos a la acción del agua meteórica, generando una notable concentración de cobre en zonas de enriquecimiento supergénico, en Los Alisos se estima que el cuerpo mineralizado principal no está expuesto, y pudiera alojarse a una profundidad aún incierta.*

*Palabras clave: pórfido de cobre, magmatismo Larámide, Los Alisos, La Caridad, Sonora, México.*

## ABSTRACT

*Los Alisos prospect is a porphyry copper deposit located in northeastern Sonora, at about 10 km northeast of La Caridad mine. It is a relatively small deposit, characterized by an intense hypogene oxidation zone exposed over 20 km<sup>2</sup>. According to the new U-Pb zircon dates reported in this work, the oldest rocks outcropping in this region consist of andesitic volcanic flows of Late Cretaceous age dated at  $73.6 \pm 1.0$  Ma, which were intruded during the Paleocene by a  $60.2 \pm 0.8$  Ma old quartz-feldspar porphyry stock. These rocks were unconformably covered by Eocene-Oligocene rhyolite lava flows and tuffs. Locally, these rocks were in turn covered by a sequence of conglomerate and sandstone with basaltic lava flows, which regionally correlates with the Miocene Baúcarit Formation. The geochemical and isotopic composition of the quartz-feldspar porphyry is characterized by a light rare earth enriched pattern (LREE), coupled with Sr and  $\epsilon$ Nd initial values of 0.7067 and -5.5, respectively. This is consistent with compositions of the intrusive rocks of the Laramide belt that were emplaced in southwestern U.S.A. and northwestern Mexico, in the region underlain by the North American Proterozoic basement. The study area is structurally complex, especially due to the effects of the regional extension associated with the development of the Basin and Range province. As a result of this extensional event, the deposit of Los Alisos occurs in an uplifted block, which is bounded by two NNW-oriented normal faults that juxtapose the Laramide volcanic sequence with Eocene-Oligocene rhyolitic lavas and Miocene rocks of the Baúcarit Formation. Unlike the large mineralized block of La Caridad, where exhumation exposed the hypogene sulfide zone to the action of meteoric water, generating an outstanding concentration of copper in supergene enrichment zones, at Los Alisos the main ore body is not exposed but may be located at some uncertain depth.*

*Key words: porphyry copper, Laramide magmatism, Los Alisos, La Caridad, Sonora, Mexico.*

## INTRODUCCIÓN

Las rocas de la Cordillera oeste norteamericana registran rasgos de una serie de eventos orogénicos superpuestos, algunos de los cuales estuvieron acompañados por el emplazamiento de grandes batolitos. Entre éstos, el evento magmático Laramide (~80–40 Ma) tiene una singular importancia en cuanto a la generación y emplazamiento de una variedad de depósitos minerales asociados a los procesos magmáticos, entre los que destacan los sistemas de pórfido de cobre. Estos depósitos se emplazaron en un cinturón estrecho, alargado de manera aproximadamente paralela a la costa del Pacífico, extendiéndose desde el suroeste de los Estados Unidos, hasta el estado de Guerrero en el sur de México (Damon *et al.*, 1983; Valencia-Moreno *et al.*, 2006). Sin embargo, los depósitos económicamente más importantes se encuentran concentrados en una región relativamente restringida, que se extiende por los estados de Arizona y Nuevo México, en el suroeste de los Estados Unidos, y el noreste de Sonora en el noroeste de México (Figura 1). En el caso de Sonora, los depósitos más destacados en esta región son Cananea y La Caridad, los cuales figuran como depósitos de cobre de clase mundial. Éstos son los principales centros mineralizados de dos importantes distritos mineros homónimos que incluyen otros depósitos relativamente menores, entre que cabe destacar a Milpillas, Mariquita, El Alacrán y El Pilar en el primero, y Florida-Barrigón, Pilares, Bella Esperanza y Los Alisos en el segundo (Figura 2).

En general, los depósitos de menor importancia económica dentro de ambos distritos han sido pobremente estudiados. Sin embargo, la existencia de concentraciones

de gran volumen, como es el caso del distrito de Cananea, hace interesante tratar de tener un mejor control geológico y geoquímico de toda esta importante zona mineralizada. Esta zona es además interesante en el sentido de que el borde oriental del cinturón de pórfidos de cobre se encuentra cubierto debajo de las secuencias volcánicas de la Sierra Madre Occidental (recuadro en Figura 3), por lo que se desconoce el potencial que pudiera haber debajo de esta cobertura.

Este estudio aporta nueva información geológica, geoquímica y geocronológica del área mineralizada del prospecto Los Alisos, el cual se localiza en un bloque levantado o *horst*, constituido esencialmente por una secuencia de rocas volcánicas andesíticas, intrusionadas y mineralizadas por un pórfido cuarzo-feldespático que se expone sólo de manera local. Su ubicación, a sólo ~10 km al noreste de mina La Caridad (Figura 2), así como su espectacular oxidación y la presencia de interesantes zonas de *stockwork* y brechas hidrotermales, han hecho de Los Alisos un sitio esperanzador en términos de exploración minera.

### MARCO CONCEPTUAL DEL CINTURÓN DE PÓRFIDOS DE COBRE DEL SUROESTE DE LA CORDILLERA NORTEAMERICANA

El origen del gran cinturón de pórfidos de cobre de la Cordillera oeste norteamericana ha sido motivo de serios análisis (*e.g.*, Tittley y Hicks, 1966; Tittley, 1982; Pierce y Bolm, 1995). Al parecer, el establecimiento de una zona de subducción de larga vida a partir del Triásico Medio, favoreció el desarrollo de magmatismo adecuado para el emplazamiento de numerosos centros de mineralización

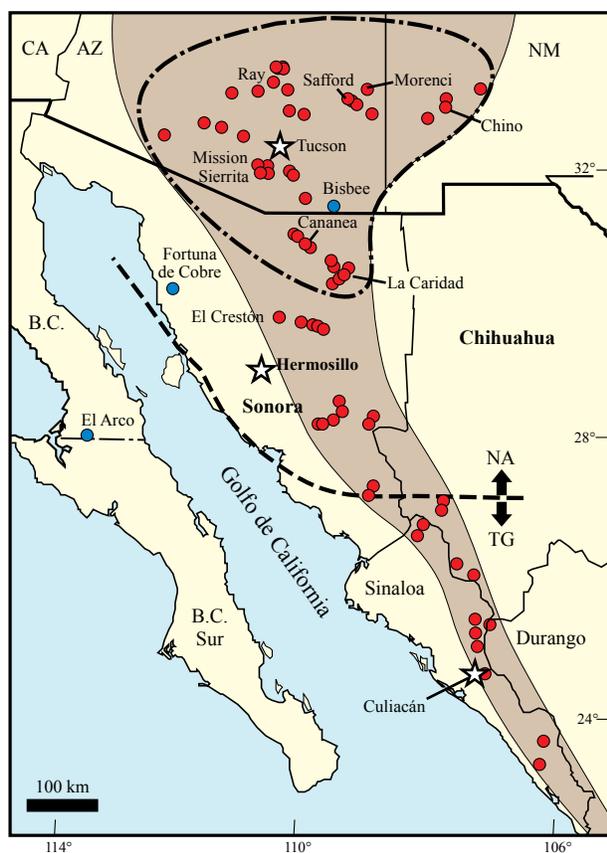


Figura 1. Mapa del noroeste del México y suroeste de los Estados Unidos mostrando el cinturón laramídico de pórfidos de cobre y la distribución de los distintos depósitos (círculos rojos). Los círculos azules representan pórfidos cupríferos más antiguos, del Jurásico Medio en el caso de Bisbee, Arizona, y El Arco, Baja California, Cretácico Tardío pre-Larámide (?) para Fortuna de Cobre. La zona delimitada por la línea discontinua encierra el llamado "gran cluster" de los pórfidos de cobre del suroeste de Norte América (ver texto). La línea continua más al sur es el límite isotópico del basamento proterozoico de Norte América (tomada de Valencia-Moreno *et al.*, 2003). NA: Norte América; TG: Terreno Guerrero.

de tipo pórfido de cobre, cuyo potencial representa una importante fracción de las reservas mundiales de este metal (Camus, 2003). A nivel mundial, los pórfidos cupríferos más relevantes están ligados con arcos magmáticos desarrollados en márgenes convergentes de tipo andino. Comúnmente estos depósitos alcanzan grandes volúmenes de mineral, caracterizados por menas de sulfuros hipogénicos de cobre y otros metales asociados, particularmente el molibdeno, los cuales están claramente asociados a la inyección de intrusivos relativamente pequeños, caracterizados por una textura fuertemente porfídica (Titley, 1982). Estos intrusivos representan fases magmáticas tardías emplazadas en los niveles subvolcánicos de la corteza, entre ~1.5–3 km (Sillitoe 1973), las cuales ascendieron en forma de columnas conectadas a intrusivos mayores alojados a mayor profundidad en la corteza, típicamente entre 5 y 8 km (Dilles 1987).

Entre el Cretácico y el Paleoceno, la región noroeste de México y suroeste de Estados Unidos estuvo sujeta a una

intensa actividad magmática, en comparación con la región contigua al norte, en la Meseta del Colorado, cuya condición amagmática y consiguiente ausencia de pórfidos de cobre, ha sido explicada en términos de un régimen tectónico de subducción plana (Saleeby, 2003). En el noroeste de México, la actividad magmática se mantuvo relativamente estática en la región de Baja California y Sinaloa, entre los 140 y ~80 Ma (Silver y Chappell, 1988). Posteriormente, durante la Orogenia Larámide (~80–40 Ma), el eje de la actividad ígnea se desplazó hacia el oriente, presumiblemente debido a una reducción del ángulo de subducción de la placa Farallón debajo de Norte América (Coney y Reynolds, 1977). Como consecuencia de esta migración se desarrolló un amplio cinturón magmático, caracterizado por grandes batolitos expuestos principalmente en la región occidental del país, y extensas secuencias volcánicas de composición mayormente intermedia, las cuales están mejor preservadas en la porción oriental de Sonora (Figura 3).

Aunque existen evidencias en esta región del emplazamiento de sistemas de pórfido de cobre más antiguos, como son los casos de Bisbee, en Arizona, y El Arco, en Baja California, ambos del Jurásico Medio (Titley, 1982; Valencia *et al.*, 2006), y posiblemente Fortuna de Cobre, en la costa de Sonora, cuya edad relativa a las rocas fechadas más cercanas pudiera ser Cretácico Tardío pre-Larámide (Valencia-Moreno *et al.*, 2006), el evento magmático Larámide fue extraordinariamente productivo en cuanto al emplazamiento de este tipo de mineralización. Los pórfidos de cobre asociados con este evento fueron emplazados de manera más abundante en los estados de Arizona y Nuevo México, y el noreste de Sonora, en una región definida por Keith y Swan (1995) como "el gran cluster de los pórfidos de cobre de Norte América" (Figura 1). De acuerdo con dichos autores, el emplazamiento del gran cluster no fue algo casual, sino el resultado de condiciones muy particulares en un segmento específico de la subducción, arriba del cual el magma calcalino reaccionó con fluidos provenientes de la corteza inferior y media que generaron las condiciones físico-químicas propicias para la acumulación de grandes cantidades de cobre. Esta zona concentra varios de los depósitos más relevantes a escala mundial, entre los que sobresalen Morenci, Chino, Tyrone, Ray, Mission, Sierrita, Safford, Cananea y La Caridad (Figura 1).

La importancia económica de los pórfidos de cobre en esta región incrementó de manera notable debido a la extensión tectónica de la corteza, que exhumó los depósitos mineralizados, exponiendo la zona de sulfuros hipogénicos para que fueran lixiviados por la acción de las aguas meteóricas. Aunado a factores climáticos favorables, esta lixiviación propició la formación de extensos horizontes de cobre reconcentrado por procesos de enriquecimiento secundario (*e.g.*, Titley, 1982). El rasgo más notable de la tectónica extensiva es sin duda el desarrollo de grandes estructuras NW-SE asociadas al fallamiento en bloque de la provincia *Basin and Range*. Estas estructuras controlaron la tasa de exhumación y, en gran medida, las condiciones

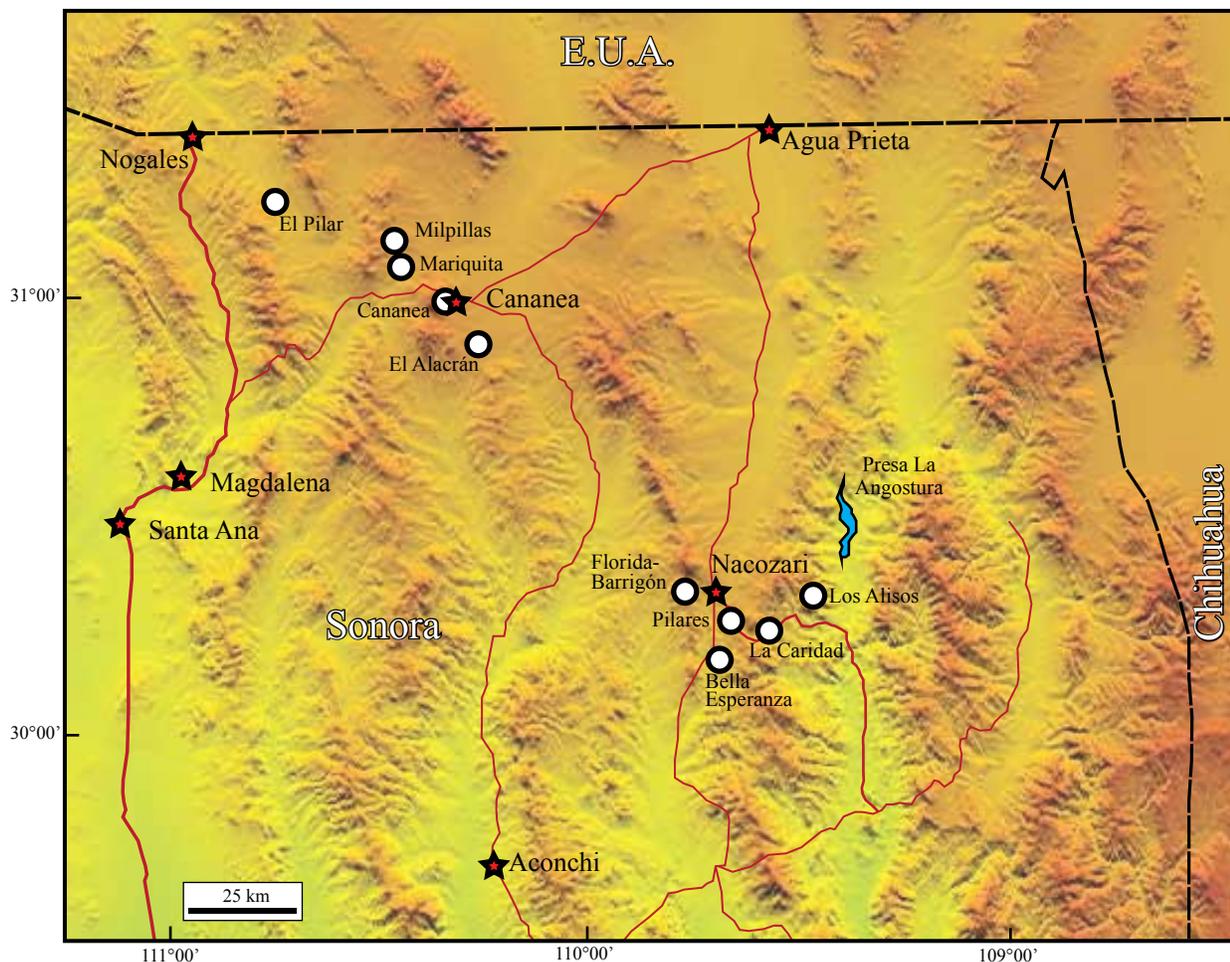


Figura 2. Mapa del noreste de Sonora mostrando la ubicación de los distintos depósitos de pórfido de cobre en los distritos de La Caridad y Cananea (círculos blancos). Las estrellas representan los principales centros poblacionales mencionados en el texto y se muestran también las principales vías de comunicación.

de preservación/erosión de los sistemas de pórfido de cobre (*e.g.*, Barton *et al.*, 1995). En algunos casos, como en el depósito El Crestón, ubicado en la porción central de Sonora (Figura 3), la extensión fue extrema, haciendo que los cuerpos mineralizados fueran rotados y disectados por fallas de tipo *detachment* (Leon y Miller, 1981; Valenzuela-Navarro *et al.*, 2005; Nourse, 2008).

### MARCO GEOLÓGICO DEL NORESTE DE SONORA

La porción más importante del cinturón de pórfidos de cobre del suroeste de Norte América fue emplazada en un basamento complejo que incluye rocas proterozoicas deformadas del Esquisto Pinal (1.68 Ga), intrusionadas por plutones graníticos con edades entre 1.41 y 1.48 Ga (Anderson y Silver, 1981, 2005; Anderson y Bender, 1989). Estas rocas forman parte del terreno de Norte América (Campa y Coney, 1983), y más particularmente de la provincia Mazatzal, caracterizada por edades modelo

relativamente más jóvenes ( $T_{DM}$  1.7–1.8 Ga) y valores iniciales de  $\epsilon Nd$  más positivos (de hasta +5), en comparación con las otras provincias proterozoicas (Bennet y DePaolo, 1987; Iriondo *et al.*, 2004; Arvizu *et al.*, 2009). Este basamento antiguo está sobreyacido por rocas sedimentarias del Neoproterozoico y del Paleozoico, que representan la extensión sur de la plataforma continental y las secuencias de talud de la Cordillera (Rangin, 1978; Stewart, 1988).

Existen reportes de rocas ígneas con edades pérmicas y triásicas que afloran de manera muy restringida en esta región de Sonora, las cuales sugieren la presencia de un arco magmático intracontinental que pudiera prolongarse por toda la región oriental del país, como lo proponen Torres-Vargas *et al.* (1999) y Grajales-Nishimura *et al.* (1992). Por el contrario, rocas del Jurásico Medio caracterizadas por secuencias volcánicas y volcanosedimentarias, con ocasionales intrusiones de granito, afloran de manera más consistente en la porción norte y noreste de Sonora (Anderson y Silver, 1978; Pérez-Segura y Echávarri, 1981; Stewart, 1988; Nourse, 2001). En el distrito de La Caridad, estas rocas afloran en el área de la sierra Cobriza, al oeste

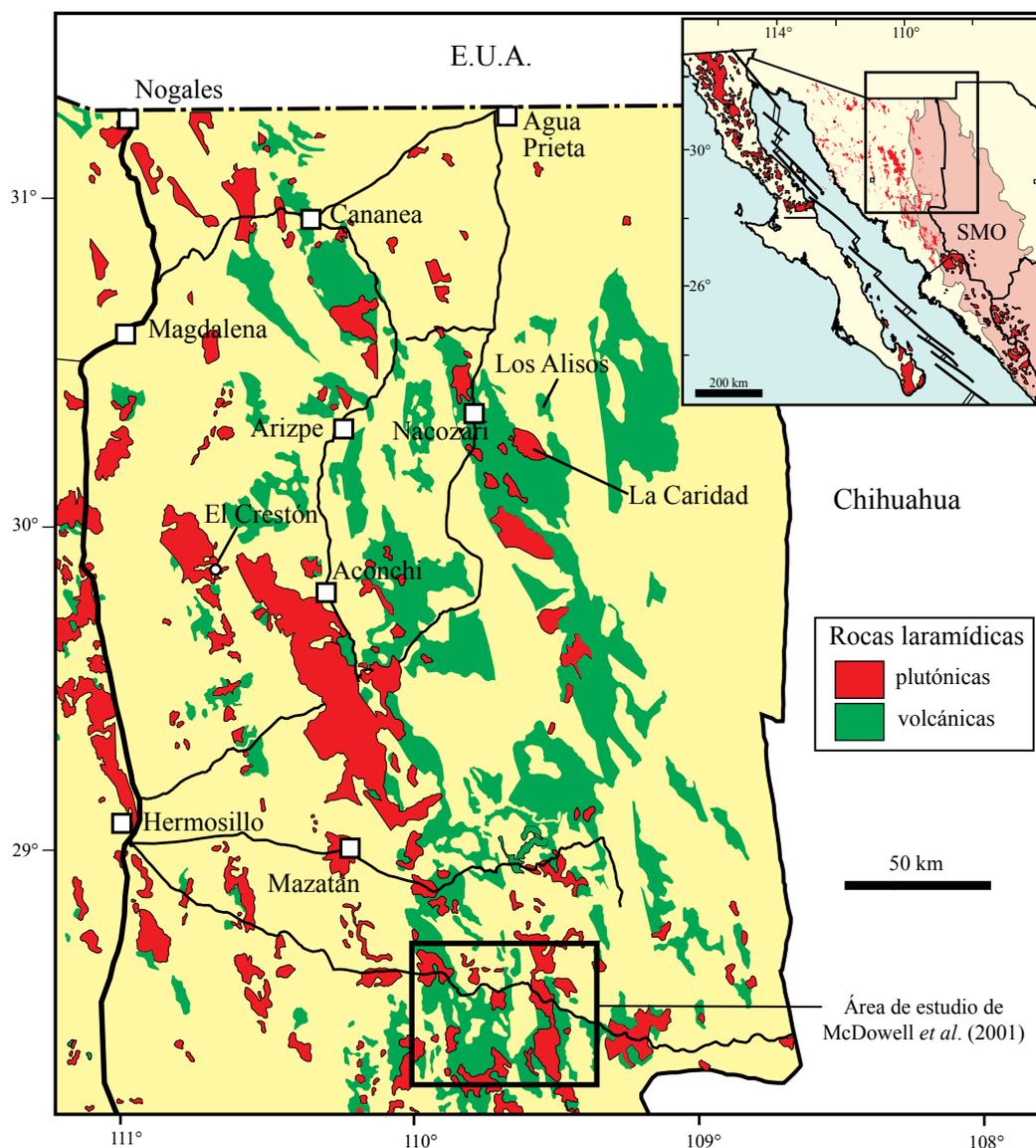


Figura 3. Mapa geológico del noreste de Sonora mostrando la distribución de los afloramientos de rocas volcánicas y plutónicas laramídicadas y algunas de las localidades mencionadas en el texto, y las principales vías de acceso. El recuadro en la esquina superior derecha muestra en color rojo los afloramientos de rocas intrusivas del Cretácico-Paleógeno en el noroeste de México, y se delinea la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMO).

del poblado de Nacoziari (Anderson *et al.*, 2005).

Reconstrucciones tectónicas sugieren que el arco magmático cordillerano migró hacia el oeste en el Jurásico Tardío (Coney y Reynolds, 1977; Damon *et al.*, 1983), y que dicha migración fue seguida por un pronunciado levantamiento cortical y erosión, caracterizado por el depósito del Conglomerado Glance (Hayes y Drewes, 1978). En el Cretácico Temprano, discordantemente sobre el Conglomerado Glance se depositaron secuencias sedimentarias de ambiente marino marginal y fluvial-deltaico, correspondientes al Grupo Bisbee (Bilodeau, 1978; González-León, 1988). Estas rocas afloran particularmente en el sureste de Arizona, suroeste de New Mexico y noreste de Sonora, en la denominada cuenca Bisbee, pero sus afloramientos se extienden hasta la porción centro-oriental

de Sonora (González-León, 1994). En el distrito de La Caridad no se han reconocido estas rocas, pero afloran de manera importante en la zona de Arizpe (González-León *et al.*, 2000), poco más al oeste del área de estudio (Figura 3).

Durante el Cretácico Tardío-Eoceno, en el noroeste de México se desarrolló un levantamiento compresivo en el cual predominaron los depósitos volcánicos y sedimentarios no marinos, incluyendo ambientes lacustres (González-León, 1994; McKee y Anderson, 1998; McDowell *et al.*, 2001). Esto ocurrió de manera contemporánea al emplazamiento del magmatismo Larámide, que afectó gran parte del suroeste de Norte América. Las rocas intrusivas asociadas con este evento están muy bien expuestas, particularmente hacia su porción occidental, donde forman grandes batolitos. En Sonora, las rocas volcánicas co-

rrelativas, definidas por Wilson y Rocha (1949) como la Formación Tarahumara, están preservadas en la región central y nororiental del estado, pero fueron erosionadas casi en su totalidad en su porción occidental (Figura 3). Más recientemente, McDowell *et al.* (2001) estudiaron estas rocas definiendo una columna conformada por un miembro inferior de composición andesítica-dacítica, y un miembro superior de composición predominantemente riolítica, con horizontes de sedimentos lacustres con restos fósiles de plantas. Estudios de U-Pb en zircones separados de muestras de rocas volcánicas expuestas en esta unidad arrojaron edades relativamente antiguas para este sector (~88–89 Ma), lo cual resulta difícil de interpretar con base en el modelo tradicional de migración magmática hacia el oriente (Valencia-Moreno *et al.*, 2006).

La típica deformación Larámide, reflejada de manera espectacular en el cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental, no se aprecia como tal en Sonora. En esta región, la deformación compresiva parece estar más relacionada con cabalgaduras de bajo ángulo, fallas inversas que levantaron bloques de basamento y algunos pliegues expuestos de manera local (González-León *et al.*, 1992). Además, se considera que esta deformación jugó un papel importante en la generación de los grandes yacimientos de oro del noroeste de Sonora, los cuales se emplazaron en vetas de cuarzo sinorogénicas, a través de zonas de cizalla desarrolladas a lo largo de planos reactivados de fallas de gran ángulo (Nourse, 2010). Aunque es innegable su existencia, aún existe gran controversia en relación a una definición conceptual de la deformación laramídica en esta región del país (*e.g.*, Calmus *et al.*, 2010).

Después de un periodo de quietud magmática durante el Eoceno Medio y Tardío (González-León *et al.*, 2000), la actividad ígnea resurgió al inicio del Oligoceno con la gran explosión ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental (McDowell y Clabaugh, 1979), cuyos afloramientos forman una de las mayores provincias volcánicas silíceas de la Tierra (Ferrari *et al.*, 2005). Posteriormente, en el Mioceno, el acercamiento progresivo de la dorsal del Pacífico a la trinchera, cambió el margen convergente por un límite transformante (Atwater, 1970; Lonsdale, 1991; Stock y Lee, 1994; Atwater y Stock, 1998), originando un régimen extensional (Rehrig, 1986; Nourse *et al.*, 1994; Parsons, 1995). En la región norte-central de Sonora, la extensión alcanzó condiciones extremas, haciendo que rocas de la corteza media fueran exhumadas rápidamente dando lugar a los denominados “complejos con núcleo metamórfico”, los cuales se exponen muy bien en un cinturón localizado hacia el oeste de la zona mineralizada de La Caridad, y cuya trayectoria es en general similar a la del cinturón de pórfidos de cobre (*e.g.*, Davies, 1979; Nourse *et al.*, 1994). La deformación extensiva continuó durante gran parte del Cenozoico, con el desarrollo del sistema de fallamiento en bloque a lo largo de la porción sur de la provincia *Basin and Range*. Algunas de las estructuras asociadas a este evento, localizadas al oriente del área de estudio, han sido reactiva-

das periódicamente, particularmente las fallas Pitáycachi, Teras y Otates (Suter y Contreras, 2002).

## Trabajos previos

Estudios geológicos en el distrito minero de La Caridad, incluyendo datos de geoquímica y geofísica, fueron llevados a cabo durante la década de 1960 por personal del entonces Consejo de Recursos Naturales No Renovables (más tarde denominado Consejo de Recursos Minerales, y actualmente Servicio Geológico Mexicano), mediante un convenio firmado por la Organización de las Naciones Unidas y el Gobierno de México. Estos trabajos permitieron determinar las áreas de mayor interés dentro del distrito minero de La Caridad, entre las cuales se consideró a Los Alisos como una zona potencialmente interesante (Lee-Moreno y Osoria-Hernández, 1965a, 1965b; Osoria-Hernández y De la Campa-Jerez, 1966; Aguilera-Schaufelberger, 1968; Osoria-Hernández y Velasco-Hernández, 1968). Con base en estos estudios se realizaron cuatro barrenos cortos en Los Alisos, con profundidades entre 50 y 150 m (Bravo-Nieto y Romero-Martínez, 1967; Velasco-Hernández, 1968; Velasco-Hernández y Del Castillo-García, 1969). De acuerdo con los resultados de estos barrenos, se estimó que la mineralización podría encontrarse relativamente profunda, en comparación con la mina La Caridad (Ramírez-Rubalcaba, 1970; Takeda, 1974; Takeda *et al.*, 1974), lo cual restó interés al prospecto. Posteriormente, en 1988 el Consejo de Recursos Minerales (CRM) llevó a cabo nuevos trabajos de exploración en el área de Los Alisos, con el fin de evaluar su potencial por oro y plata, con resultados igualmente poco alentadores. Después, los trabajos de geología a semidetalle continuaron a cargo del Departamento de Exploraciones de Mexicana de Cobre, S.A. de C.V., con el objeto de afinar el control cartográfico de la zona y ubicar los sitios más favorables para hospedar mineralización. Más recientemente, Valencia *et al.* (2005) realizaron una serie de fechamientos U-Pb en zircones y Re-Os en molibdenitas para estimar la duración del magmatismo y la mineralización en La Caridad. Sus resultados indicaron un lapso de tiempo relativamente corto para el evento magmático entre  $55.5 \pm 1.7$  y  $52.6 \pm 1.6$  Ma, y una edad más restringida para el pulso mineralizante de  $53.7 \pm 0.2$  Ma.

## GEOLOGÍA DEL PROSPECTO LOS ALISOS

En la Figura 4 se presenta un mapa geológico del área de estudio, en el cual se puede apreciar la distribución de los afloramientos de las distintas unidades reconocidas y las estructuras más relevantes de la zona de La Caridad-Pilares-Los Alisos, así como la localización de las muestras fechadas que se reportan en este trabajo. Las rocas más antiguas afloran en la sierra La Cobriza, ubicada al oeste del

poblado de Nacozari, las cuales están localmente representadas por las Formaciones Lily y Coppercuin (McAnulty, 1970). La primera es una secuencia metamorfizada de tobas, grauwacas, arcosas, cuarcitas y calizas, con un espesor expuesto de más de 500 m. La segunda, sobreyace a la Formación Lily, y está conformada por una secuencia de unos 300 m de espesor de calizas, areniscas y lutitas. Sin embargo, trabajos más recientes definen a la Formación Lily como una secuencia de conglomerados de fragmentos volcánicos, areniscas, cuarzoarenitas, tobas líticas, tobas soldadas y estratos de carbonatos lacustres subordinados (Figura 5), depositados en una cuenca intra-arco del Jurásico Medio (González-León, *et al.*, 2008; Lawton, *et al.*, 2008).

En las cercanías al área de Los Alisos, las rocas más antiguas corresponden a las rocas volcánicas laramídicas, que se correlacionan de manera regional con la Formación Tarahumara (Figura 5). Estas rocas se encuentran ampliamente distribuidas en todo el distrito de La Caridad (Figura 4), y consisten en lavas y tobas de composición intermedia con textura afanítica a porfídica, incluyendo horizontes aglomeráticos y flujos piroclásticos de textura

brechoide y tobas de grano fino. Nuevas fechas isotópicas para constreñir la edad de esta formación fueron publicadas recientemente por González-León *et al.* (2011). Localmente, esta secuencia volcánica andesítica fue intrusionada por una granodiorita que se expone muy bien al este-sureste de la mina La Caridad, y al oeste de Nacozari, así como por intrusivos relativamente pequeños de textura porfídica, cuyos principales afloramientos se observan en la zona de la mina La Caridad, hacia el borde occidental del plutón granodiorítico (Figura 4). Discordantemente sobre este complejo ígneo aflora una secuencia de flujos riolíticos fechados por K-Ar en  $51.3 \pm 1.0$  Ma (Livingston, 1973). Esta unidad se expone muy bien hacia el oriente de la mina La Caridad, en la zona de La Caridad Vieja (Figura 4), donde estas rocas muestran estructuras en forma de domos y cuellos volcánicos (Figura 6).

Al final de este evento riolítico se depositó un conglomerado compuesto por fragmentos angulosos y subangulosos a subredondeados de granodiorita, diorita, andesita y pórfido monzonítico, cementado por una matriz de óxidos de hierro, lo cual le da una coloración rojiza muy particular.

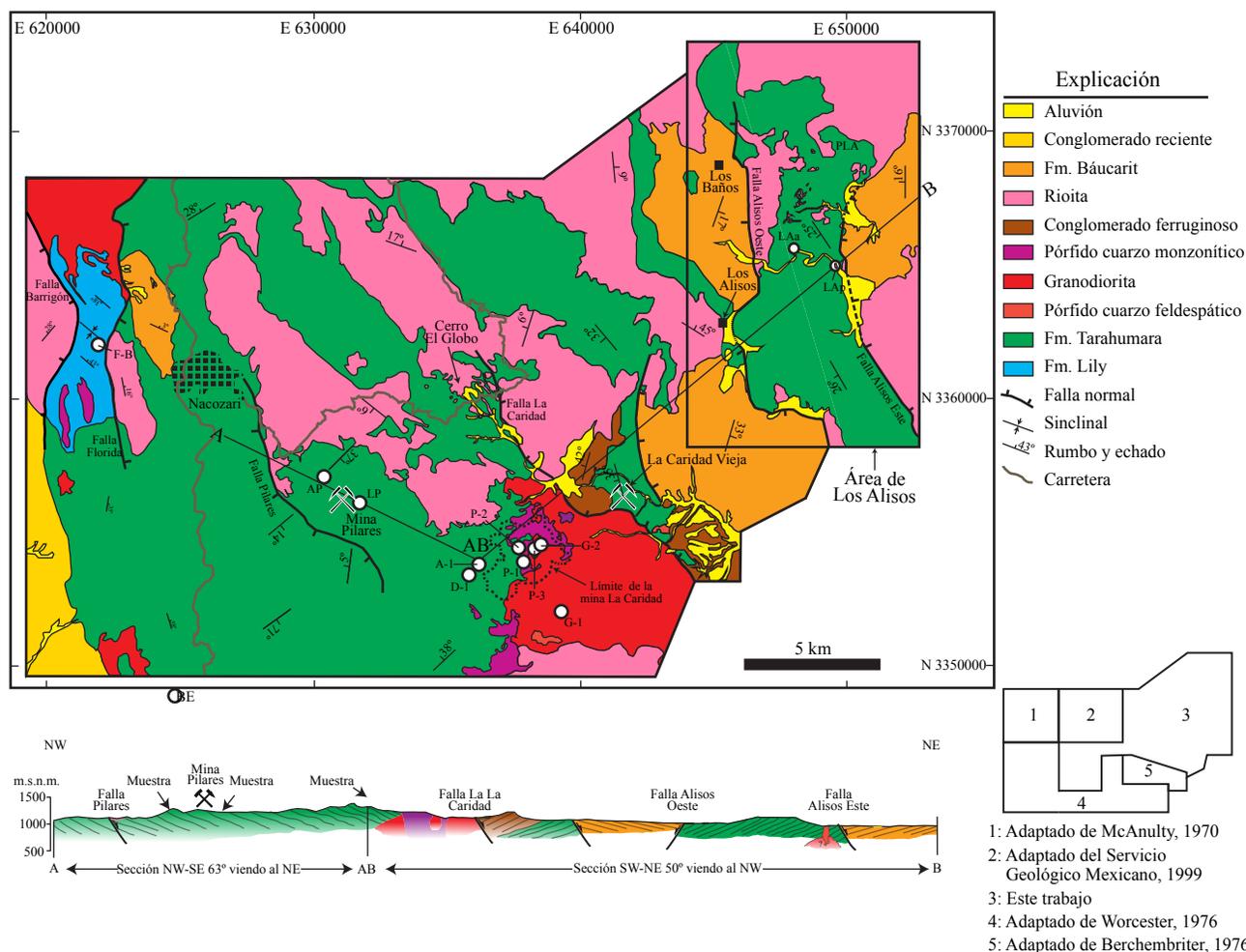


Figura 4. Mapa geológico del distrito de La Caridad mostrando la distribución de las distintas unidades litológicas, así como las estructuras mayores mencionadas en el texto. Los círculos blancos indican la ubicación de las muestras fechadas resumidas en la Tabla 1.

Esta unidad, denominada en este trabajo “conglomerado ferruginoso” (Figura 5), aflora de manera local en la porción norte-noreste de la mina La Caridad, extendiéndose un poco más hacia el este-sureste (Figura 4). Esta secuencia conglomerática contiene además horizontes de pocos metros de espesor de tobas arenosas (Figura 7), cuya edad absoluta se desconoce.

Hacia la base, la relación estratigráfica del conglomerado ferruginoso con las riolitas de La Caridad Vieja es discordante, y se asume que su característica matriz ferruginosa proviene de la erosión del capote lixiviado de los sistemas de pórfidos de cobre (Saegart *et al.*, 1974). Hacia la cima, su relación también es discordante con una gruesa secuencia de flujos de lavas y tobas, que se correlacionan de manera regional con las rocas ignimbríticas de la Sierra Madre Occidental. Esta unidad volcánica, cuya edad K-Ar indica  $24 \pm 0.4$  Ma (Livingston, 1973), ha sido denominada localmente “riolita El Globo” (Figura 5) debido a que su

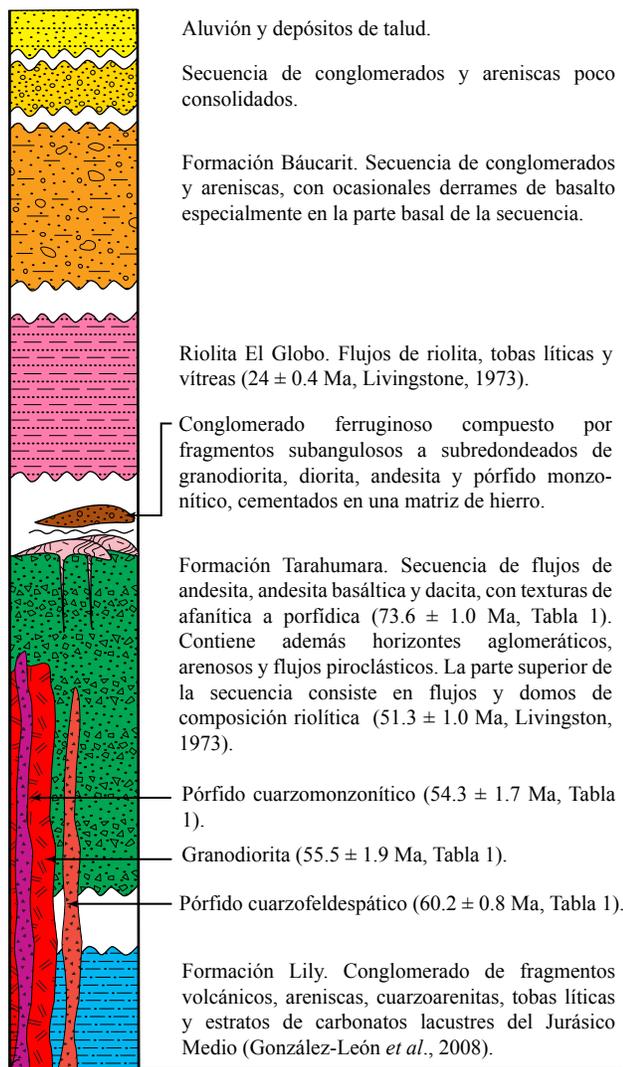


Figura 5. Columna estratigráfica esquematizada mostrando las unidades litológicas que afloran en el distrito de La Caridad (sin escala).



Figura 6. Fotografía de los intrusivos riolíticos con estructuras de cuello volcánico que afloran en el área de La Caridad Vieja (Figura 4), al suroeste del prospecto Los Alisos. Estas rocas cortan parte de las rocas volcánicas andesíticas de la Formación Tarahumara, y están localmente mineralizadas. En la fotografía se alcanzan a apreciar aspectos de la intensa alteración hidrotermal y una serie de trabajos antiguos desarrollados para extraer mineral de alta ley.

principal afloramiento en el área de La Caridad se ubica en el cerro El Globo (Figura 4).

Posteriormente, en el Mioceno, las cuencas formadas durante el evento *Basin and Range* fueron rellenas con depósitos clásticos regionalmente reconocidos como Formación Báucarit (Figuras 4 y 5). Esta unidad está constituida por conglomerados y areniscas lutíticas, que afloran de manera espectacular en la parte oriental del distrito, en los alrededores del rancho Los Alisos y la zona de Los Baños (Figura 4). Por último, las partes topográficamente más bajas del área fueron cubiertas por conglomerados y areniscas poco consolidados, depósitos de talud y sedimentos aluviales que pueden correlacionarse regionalmente con el Grupo Sonora (Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana, 1998).

## GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Al oeste del distrito minero de La Caridad, la deformación laramídica involucra a las rocas del Grupo Bisbee, del Cretácico Temprano, las cuales muestran un fuerte plegamiento y fallamiento inverso con vergencia hacia el noreste (González-León *et al.*, 2000). Sin embargo, las estructuras con mayor presencia en el área de estudio corresponden a la extensión cortical asociada a la parte sur de la provincia *Basin and Range*, la cual se extiende hasta la Faja Volcánica Transmexicana, en el centro del país (Luhr *et al.*, 2001). Esta fase extensional está representada por dos tipos principales de estructuras. El primero corresponde a fallas normales de bajo ángulo que descubijaron el basamento, exponiendo rocas dúctilmente deformadas de la corteza media a inferior. Esta tectónica extensiva está relacionada a la exhumación



Figura 7. Fotografía que muestra un corte a lo largo del camino que une Nacozari con la mina La Caridad, en la que se puede observar un afloramiento del ferriconglomerado cubierto por horizontes de tobas lacustres pseudoestratificadas de color claro, y las cuales descansan debajo de la riolita El Globo.

de los complejos con núcleo metamórfico (e.g., Nourse *et al.*, 1994; Vega-Granillo y Calmus, 2003), la cual no parece haber afectado el área del distrito de La Caridad, pero sí un cinturón ubicado hacia el oeste, y cuyos principales aflora-

mientos se localizan en las zonas de Magdalena, Aconchi y Mazatán (Figura 3). Plutones hiperaluminosos expuestos en la sierra de Aconchi, con edades isotópicas entre 40 y 36 Ma, han sido asociados al destechamiento del sistema extensivo (Roldán-Quintana, 1991; Lugo-Zazueta, 2006). Más al sur, en otro complejo similar ubicado en la sierra de Mazatán, se obtuvo una edad de 18 Ma en apatitos (Vega-Granillo y Calmus, 2003), la cual contriñe la edad superior del proceso de exhumación.

El segundo tipo de estructuras asociadas a la provincia *Basin and Range* corresponde a fallas normales de gran ángulo que delimitan grandes bloques levantados y hundidos, con orientaciones NW-SE y N-S, principalmente. Esta deformación es el principal control para la morfología de sierras y valles, típica de la región noroeste de México y el occidente de los Estados Unidos (Henry y Aranda-Gómez, 1992; Parsons, 1995; Luhr *et al.*, 2001). La edad del fallamiento en bloque ha sido interpretada con base en la presencia de flujos basálticos, los cuales se asume fueron extravasados a lo largo de las fallas normales, depositándose de manera interestratificada en la parte inferior de los gruesos depósitos clásticos de la Formación Báucarit. Flujos de lavas bimodales expuestos en una cuenca de este tipo en la región de Arizpe, al oeste del área de estudio (Figura 2), sugieren edades radiométricas entre ~25 y 21 Ma, lo cual

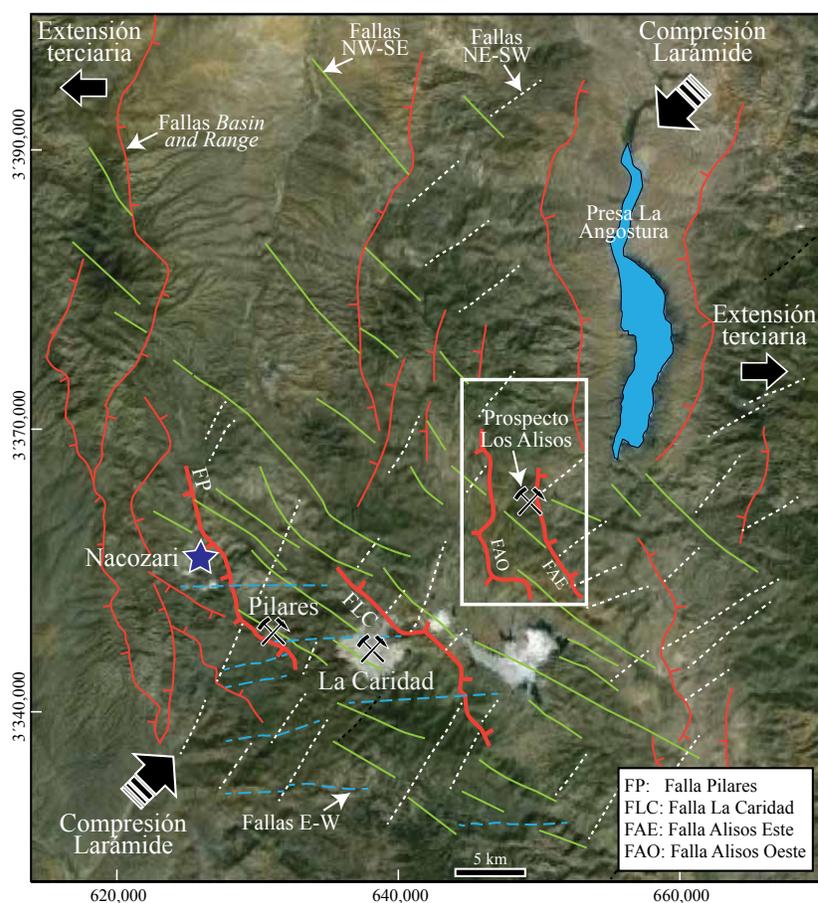


Figura 8. Mapa de la distribución de las diferentes familias de fallas que se reconocen en el distrito de La Caridad.

da una idea aproximada de la edad de estas estructuras en esta región de Sonora (González-León *et al.*, 2010).

En el área de Los Alisos y sus alrededores se presenta un sistema de fallas agrupadas en cuatro familias principales (Figura 8); tres de ellas de rumbo general NW-SE, NE-SW y E-W, las cuales son consideradas estructuras pre-*Basin and Range*, algunas de la cuales podrían ser de edad Jurásico Tardío (Anderson y Nourse, 2005), y una cuarta familia de rumbo general NNW-SSE, que representa al evento extensional *Basin and Range*. Las estructuras con orientación NW-SE, que son las que muestran los lineamientos de mayor longitud dentro de la familia pre-*Basin and Range*, se presentan lateralmente persistentes, y ocurren como fallas individuales así como en estructuras múltiples. Su distribución es variable, aunque se presentan principalmente en las cercanías a la mina La Caridad. Dichas estructuras han sido interpretadas como producto de cizallamiento asociado a la compresión Larámide (NE-SW), lo que provocó una fuerte componente transpresional (Era Maptec, 1995), con la generación de fallas inversas y fallas de rumbo lateral izquierdo (Figura 9a).

Las estructuras NE-SW presentan lineamientos con longitudes promedio menores a las de la familia NW-SE, y se observan de manera más importante en el sur del área de estudio. Estas fallas y fracturas se interpretan como estructuras extensionales formadas durante la compresión Larámide como respuesta al movimiento sinistral principal del área, aunque algunas de ellas pudieran tener historias más antiguas y corresponder a estructuras reactivadas durante el evento Larámide. En Los Alisos, estas estructuras se encuentran mayormente en las rocas volcánicas andesíticas, donde generalmente presentan rellenos de cuarzo y pirita, que sugieren la circulación de fluidos mineralizantes durante las etapas tardías en la formación de los sistemas de pórfido cuprífero.

Las estructuras con orientación E-W, las cuales ocurren de manera aislada, se localizan hacia el oeste y sur de la mina La Caridad. Se consideran también como estructuras extensionales que al interactuar con las fallas NW-SE dieron lugar a zonas de dilatación (Figura 9b), que pudieron ser aprovechadas subsecuentemente para el emplazamiento de mineralizaciones (Era Maptec, 1995).

Las estructuras dominantes, relacionadas con el evento *Basin and Range*, presentan longitudes de hasta 45 km, con una apariencia escalonada como resultado de la reactivación de estructuras preexistentes y/o a la asociación de estructuras entre segmentos de fallas. Estas fallas son normales y su rumbo varía de NNW-SSE a N-S, indicando una extensión aproximadamente ESW-WNE a E-W. Dentro de este patrón de estructuras, seis fallas que delimiten tres bloques levantados (*horsts*), sobresalen por su especial interés económico en la región: Barrigón, Florida, Pilares, La Caridad, Alisos oeste y Alisos este (Figura 4). Las fallas Barrigón y Florida delimitan el bloque más occidental, en el cual afloran las rocas del Jurásico Medio de la Formación Lily (González-León *et al.*, 2008; Lawton *et al.*, 2008). Las

fallas Pilares y La Caridad definen un bloque intermedio, en el cual se localizan las minas homónimas (Figura 4), en el cual se concentra el principal potencial minero del distrito. El tercer bloque es el de Los Alisos el cual es el más oriental y presenta una orientación N-S. La falla Alisos oeste limita

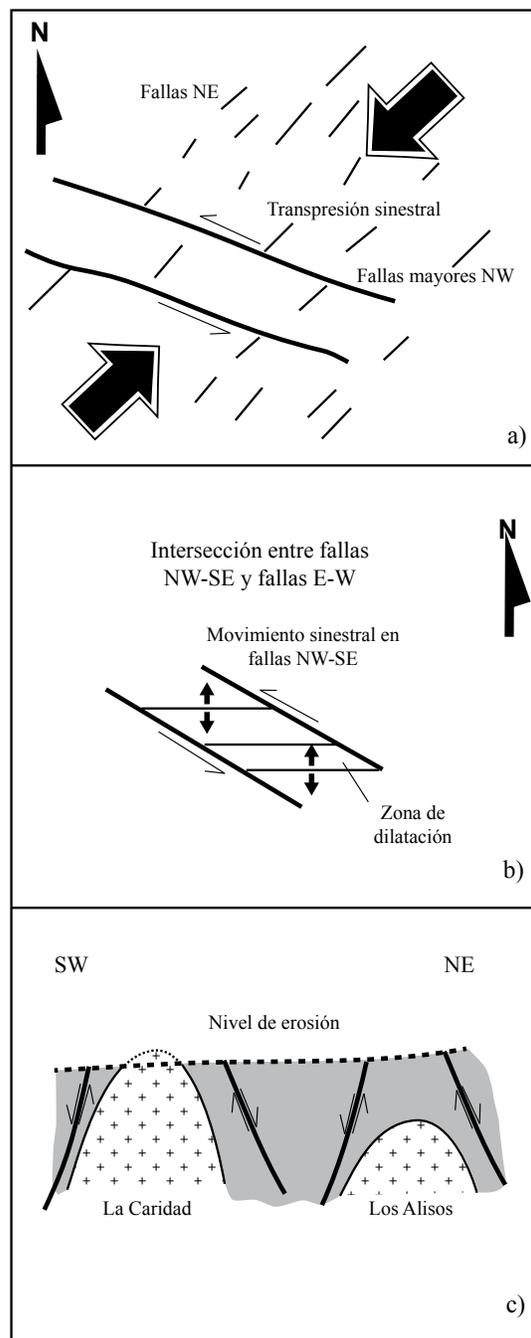


Figura 9. Dibujos esquematizados de los distintas etapas de deformación observadas en el distrito de La Caridad; a) cizallamiento asociado a la compresión Larámide (NE-SW), mostrando una fuerte componente transpresional; b) movimiento sinistral asociado a la intersección de fallas NW-SE y E-W, con el desarrollo de zonas de dilatación pre-*Basin and Range*; c) fallas tipo *Basin and Range*, formando estructuras apximadamente paralelas, pero con diferentes tasas de exhumación (modificado de Era Maptec, 1995).

dicho bloque al oeste con un rumbo general NNW-SSE y echado hacia el W mientras que al oriente se encuentra delimitado por una serie de fallas de rumbo irregular al NW-SE y NE-SW con echados hacia al E (Arreola-Razura y Roldán-Quintana, 1988), que en su conjunto forman una lineación aproximadamente N-NW. Este bloque está compuesto principalmente por rocas andesíticas de la Formación Tarahumara, cubiertas discordantemente hacia el norte por las rocas riolíticas del Oligoceno (Livingston, 1973).

Estas estructuras extensionales han controlado la preservación o exposición de los sistemas de pórfido cuprífero a nivel regional, definiendo diferentes niveles de exposición de los sistemas mineralizados en cada región (Wilkins y Heidrick, 1995; Tittley, 2001; Nourse, 2008). Así, mientras que en la mina La Caridad el nivel de erosión permitió la exposición del complejo intrusivo mineralizante en la superficie, en Los Alisos este complejo no logró aflorar (Figura 9c), aunque su existencia puede deducirse de la notable oxidación y la presencia de sulfuros diseminados en la roca encajonante, sugiriendo una tasa de exhumación relativamente menor que en La Caridad.

## GEOCROLOGÍA

Existen algunas fechas isotópicas disponibles que ayudan a constreñir la evolución magmática del distrito de La Caridad, las cuales se resumen en la Tabla 1. Damon *et al.* (1983) reportaron una serie de edades K-Ar de distintos depósitos localizados en la región de Nacozari, las cuales sugieren un rango temporal entre  $55.9 \pm 1.2$  Ma y  $52.4 \pm 1.1$  Ma para los pulsos intrusivos asociados a la mineralización de cobre. Las rocas laramídicas expuestas en el *horst*

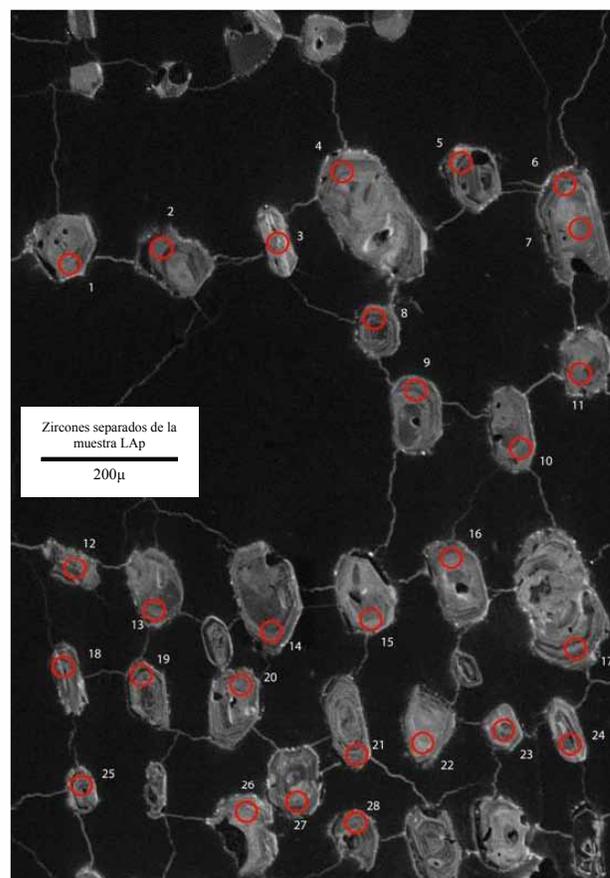


Figura 10. Fotomicrografía de catodoluminiscencia donde se puede apreciar el arreglo de los zircones separados de la muestra del pórfido cuarzo-feldespático de Los Alisos. Los círculos en color rojo indican las zonas de los cristales seleccionados para realizar los análisis isotópicos.

Tabla 1. Compilación de edades radiométricas en el distrito minero de La Caridad.

Edad (Ma)	Método	Roca	Localidad	Referencia
24.0 ± 0.4	K-Ar (biotita)	Riolita	Cerro El Globo	Livingston, 1973
51.3 ± 1.0	K-Ar	Latita	La Caridad Antigua	Livingston, 1973
54.3 ± 0.8	K-Ar (biotita)	Cuarzo monzonita	La Caridad	Salas, 1975
50.0 ± 1.2	K-Ar (biotita)	Cuarzo monzonita	La Caridad	Salas, 1975
53.0 ± 0.4	K-Ar (biotita)	Pórfido cuarzo-monzonítico	La Caridad	Sillitoe, 1976
52.4 ± 1.1	K-Ar (biotita)	Granito con alteración	Florida-Barrigón (F-B)	Damon <i>et al.</i> , 1983
40.0 ± 0.9	K-Ar (biotita)	Granodiorita	Bella Esperanza (BE)	Damon <i>et al.</i> , 1983
64.2 ± 2.5	U-Pb zircón	Andesita (A-1)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
55.5 ± 1.9	U-Pb zircón	Granodiorita (G-1)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
55.6 ± 1.7	U-Pb zircón	Granodiorita (G-2)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
54.3 ± 1.7	U-Pb zircón	Pórfido cuarzo-monzonítico (p-1)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
54.3 ± 1.7	U-Pb zircón	Pórfido cuarzo-monzonítico (p-2)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
52.6 ± 1.6	U-Pb zircón	Dique porfídico (P-3)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
64.2 ± 2.5	U-Pb zircón	Andesita (A-1)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
58.3 ± 2.0	U-Pb zircón	Diorita (D-1)	La Caridad	Valencia <i>et al.</i> , 2005
73.6 ± 1.0	U-Pb zircón	Andesita (LAa)	Los Alisos	Este estudio
60.2 ± 0.8	U-Pb zircón	Pórfido feldespático (LAp)	Los Alisos	Este estudio
64.3 ± 0.9	U-Pb zircón	Andesita basáltica (AP)	Pilares	Este estudio
64.2 ± 0.8	U-Pb zircón	Traquiandesita (LP)	Pilares	Este estudio

central, dividido por las fallas Pilares y La Caridad, fueron estudiadas más recientemente por Valencia *et al.* (2005), reportando edades U/Pb en zircones de  $64.2 \pm 0.8$  y  $64.3 \pm 0.9$  Ma para una andesita. De acuerdo con dichos autores, estas rocas están intrusionadas por una granodiorita y por un pórfido cuarzo-monzonítico asociado a la mineralización, cuyas edades U/Pb en zircones indican  $55.5 \pm 1.7$  y  $54.3 \pm 1.7$  Ma, respectivamente. Reportan además dos edades Re-Os prácticamente idénticas en molibdenitas, las cuales sugieren que el pulso mineralizante ocurrió a los  $53.7 \pm 0.2$  Ma.

Dos edades U/Pb en zircones separados de rocas del área de Los Alisos fueron obtenidas para este estudio (Figura 10), además de otras dos muestras colectadas cerca de la mina Pilares, y cuyos resultados están también resumidos en la Tabla 1. Los zircones separados fueron selectivamente vaporizados por ablación láser y analizados utilizando un espectrómetro de masas con sistema multicolector con plasma de acoplado inductivamente (LA-MC-ICPMS), instalado en el *Arizona Laser ChronCenter* del Departamento

de Geociencias de la Universidad de Arizona, siguiendo los procedimientos descritos por Valencia *et al.* (2005). Los resultados de estos análisis se presentan en la Tabla 2.

En las Figuras 11, 12 y 13 se presentan los resultados analíticos obtenidos de manera gráfica, en diagramas construidos utilizando Isoplot/Ex versión 3.0 (Ludwig, 2003). La primera muestra de Los Alisos corresponde a una roca volcánica andesítica de la Formación Tarahumara, denominada “andesita Los Alisos” (LAa), cuyos resultados indican una edad media ponderada  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de  $73.6 \pm 1.0$  Ma ( $n=30$ , 1 excluida,  $2\sigma$ ) (Figura 11a). Esta edad está representada también en un diagrama de concordia, en el que se puede ver una aglomeración en las elipses de error hacia los  $\sim 74$  Ma, mientras que una edad que no fue considerada está representada por la elipse superior, claramente separada del resto de las edades (Figura 11b). La segunda muestra de Los Alisos fue tomada de un afloramiento pequeño del pórfido cuarzo-feldespático, denominado “pórfido Los Alisos” (LAp), y los resultados indican una edad media ponderada de  $60.2 \pm 0.8$  Ma ( $n=28$ ,  $2\sigma$ ) (Figura 11c). Aunque una de

Tabla 2. Resultados de los análisis geocronológicos de U-Pb.

#	U (ppm)	Th/U	Relaciones y errores isotópicos								Edades aparentes (Ma)					
			$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{207}\text{Pb}$	$\pm$ (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm$ (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm$ (%)	error corr.	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm$ (Ma)	$^{206}\text{Pb}^*/^{207}\text{Pb}^*$	$\pm$ (Ma)
<i>LP: Latita</i>																
1	167	1.0	830	20.0409	7.8	0.0680	11.5	0.0099	8.4	0.74	63.4	5.3	66.8	7.4	190.2	180.8
2	395	0.6	1402	20.8027	3.1	0.0667	3.3	0.0101	1.1	0.33	64.5	0.7	65.5	2.1	102.7	73.9
3	335	1.6	1181	20.3203	6.0	0.0688	6.1	0.0101	1.0	0.16	65.0	0.6	67.5	4.0	157.9	140.3
4	<b>254</b>	<b>2.1</b>	<b>29408</b>	<b>11.0944</b>	<b>1.0</b>	<b>3.0806</b>	<b>1.4</b>	<b>0.2479</b>	<b>1.0</b>	<b>0.71</b>	<b>1427.5</b>	<b>12.8</b>	<b>1427.9</b>	<b>10.9</b>	<b>1428.4</b>	<b>19.1</b>
5	<b>131</b>	<b>1.5</b>	<b>16882</b>	<b>10.8481</b>	<b>1.0</b>	<b>3.1291</b>	<b>1.4</b>	<b>0.2462</b>	<b>1.0</b>	<b>0.71</b>	<b>1418.8</b>	<b>12.7</b>	<b>1439.9</b>	<b>10.9</b>	<b>1471.1</b>	<b>19.0</b>
6	199	1.3	1144	19.6975	7.9	0.0695	9.1	0.0099	4.5	0.49	63.7	2.8	68.2	6.0	230.3	182.8
7	196	0.8	1483	19.6209	9.8	0.0687	9.9	0.0098	1.3	0.13	62.7	0.8	67.5	6.5	239.3	227.4
8	354	1.0	2262	19.7794	7.4	0.0697	7.4	0.0100	1.0	0.13	64.2	0.6	68.4	4.9	220.7	170.4
9	274	0.9	1737	19.8902	8.6	0.0697	8.7	0.0100	1.2	0.14	64.5	0.8	68.4	5.7	207.8	199.5
10	416	0.6	2442	20.2620	4.8	0.0677	4.9	0.0099	1.0	0.21	63.8	0.6	66.5	3.1	164.6	111.1
11	231	1.3	3187	20.1224	5.6	0.0675	9.8	0.0098	8.1	0.82	63.2	5.1	66.3	6.3	180.8	131.3
12	256	1.3	1925	20.3906	5.5	0.0674	5.6	0.0100	1.0	0.18	63.9	0.6	66.2	3.6	149.8	129.0
13	<b>349</b>	<b>2.2</b>	<b>44112</b>	<b>9.9692</b>	<b>1.0</b>	<b>3.7010</b>	<b>2.2</b>	<b>0.2676</b>	<b>2.0</b>	<b>0.89</b>	<b>1528.6</b>	<b>26.5</b>	<b>1571.6</b>	<b>17.5</b>	<b>1629.8</b>	<b>18.6</b>
14	1151	0.5	4952	20.6432	3.5	0.0685	3.7	0.0103	1.0	0.28	65.7	0.7	67.2	2.4	120.9	83.4
15	252	1.2	1485	19.5233	9.4	0.0703	9.6	0.0100	1.9	0.20	63.9	1.2	69.0	6.4	250.8	215.8
16	160	1.4	1833	18.5390	13.7	0.0740	13.8	0.0100	1.8	0.13	63.8	1.1	72.5	9.7	368.5	309.8
17	213	1.0	1059	20.0304	5.9	0.0692	6.1	0.0101	1.4	0.23	64.5	0.9	68.0	4.0	191.4	137.4
18	353	1.0	2276	19.7791	7.7	0.0699	7.8	0.0100	1.0	0.13	64.3	0.6	68.6	5.1	220.7	178.2
19	220	1.4	3124	20.3511	5.6	0.0683	6.0	0.0101	2.2	0.37	64.7	1.4	67.1	3.9	154.4	131.1
20	212	1.4	1719	19.6454	9.0	0.0710	9.2	0.0101	1.5	0.16	64.9	0.9	69.6	6.2	236.4	209.1
21	233	1.3	1636	20.1858	6.3	0.0677	6.5	0.0099	1.4	0.22	63.6	0.9	66.5	4.2	173.4	147.3
22	<b>574</b>	<b>1.2</b>	<b>118398</b>	<b>9.9521</b>	<b>1.1</b>	<b>3.9432</b>	<b>2.5</b>	<b>0.2846</b>	<b>2.2</b>	<b>0.90</b>	<b>1614.6</b>	<b>31.4</b>	<b>1622.6</b>	<b>19.9</b>	<b>1633.0</b>	<b>20.3</b>
23	<b>167</b>	<b>1.0</b>	<b>1241</b>	<b>20.7244</b>	<b>3.4</b>	<b>0.0817</b>	<b>3.5</b>	<b>0.0123</b>	<b>1.0</b>	<b>0.28</b>	<b>78.7</b>	<b>0.8</b>	<b>79.8</b>	<b>2.7</b>	<b>111.6</b>	<b>79.9</b>
24	523	0.5	3491	20.0420	6.3	0.0684	6.3	0.0099	1.0	0.16	63.7	0.6	67.1	4.1	190.1	146.0
25	288	0.6	910	20.1659	6.5	0.0687	6.7	0.0100	1.7	0.25	64.5	1.1	67.5	4.4	175.7	151.3
26	233	0.7	1464	19.9799	8.1	0.0685	8.3	0.0099	1.9	0.23	63.7	1.2	67.3	5.4	197.3	189.0
27	370	1.1	2910	20.0885	7.2	0.0698	7.5	0.0102	2.2	0.29	65.2	1.4	68.5	5.0	184.7	168.4
28	560	0.9	4267	20.8090	3.7	0.0662	3.9	0.0100	1.0	0.26	64.1	0.6	65.1	2.4	102.0	88.0
29	299	0.9	856	18.9830	11.2	0.0714	11.3	0.0098	1.6	0.14	63.0	1.0	70.0	7.7	315.0	256.2

continúa

Tabla 2 (continuación). Resultados de los análisis geocronológicos de U-Pb.

#	U (ppm)	Th/U	Relaciones y errores isotópicos								Edades aparentes (Ma)					
			$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{207}\text{Pb}$	$\pm$ (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm$ (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm$ (%)	error corr.	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm$ (Ma)	$^{206}\text{Pb}^*/^{207}\text{Pb}^*$	$\pm$ (Ma)
<i>AP: Andesita Pilares</i>																
1	444	0.8	4005	20.9451	3.0	0.0672	3.7	0.0102	2.2	0.59	65.5	1.4	66.0	2.4	86.6	71.2
2	354	0.8	2507	19.9102	6.3	0.0702	6.3	0.0101	1.0	0.16	65.0	0.6	68.9	4.2	205.4	145.4
3	197	0.7	1674	20.1273	6.9	0.0672	7.0	0.0098	1.3	0.18	63.0	0.8	66.1	4.5	180.2	161.4
4	<b>120</b>	<b>0.6</b>	<b>4158</b>	<b>10.6704</b>	<b>1.8</b>	<b>3.2791</b>	<b>2.1</b>	<b>0.2538</b>	<b>1.0</b>	<b>0.49</b>	<b>1457.9</b>	<b>13.1</b>	<b>1476.1</b>	<b>16.0</b>	<b>1502.4</b>	<b>33.9</b>
5	426	0.9	2392	20.8646	3.3	0.0661	3.5	0.0100	1.0	0.29	64.1	0.6	65.0	2.2	95.7	79.2
6	239	0.9	1775	20.1840	5.1	0.0683	5.3	0.0100	1.3	0.24	64.1	0.8	67.1	3.4	173.6	119.2
7	1337	0.5	7336	20.6257	3.6	0.0667	3.8	0.0100	1.0	0.27	64.0	0.6	65.6	2.4	122.9	85.7
8	283	0.9	1678	20.1209	6.2	0.0683	6.4	0.0100	1.4	0.22	63.9	0.9	67.1	4.1	180.9	144.8
9	<b>200</b>	<b>1.6</b>	<b>24576</b>	<b>11.0923</b>	<b>1.2</b>	<b>2.9676</b>	<b>1.7</b>	<b>0.2387</b>	<b>1.1</b>	<b>0.66</b>	<b>1380.1</b>	<b>13.5</b>	<b>1399.4</b>	<b>12.6</b>	<b>1428.8</b>	<b>23.8</b>
10	<b>818</b>	<b>5.9</b>	<b>97145</b>	<b>11.0021</b>	<b>1.0</b>	<b>3.1252</b>	<b>1.4</b>	<b>0.2494</b>	<b>1.0</b>	<b>0.71</b>	<b>1435.3</b>	<b>12.9</b>	<b>1438.9</b>	<b>10.9</b>	<b>1444.3</b>	<b>19.1</b>
11	<b>297</b>	<b>0.9</b>	<b>1369</b>	<b>19.3999</b>	<b>2.5</b>	<b>0.2591</b>	<b>2.7</b>	<b>0.0365</b>	<b>1.0</b>	<b>0.37</b>	<b>230.8</b>	<b>2.3</b>	<b>234.0</b>	<b>5.7</b>	<b>265.3</b>	<b>58.2</b>
12	290	0.7	2815	19.4426	8.7	0.0724	8.8	0.0102	1.7	0.19	65.4	1.1	70.9	6.0	260.3	199.1
13	554	0.7	5275	20.2172	6.5	0.0693	6.6	0.0102	1.3	0.20	65.2	0.8	68.1	4.3	169.8	151.0
14	<b>173</b>	<b>1.9</b>	<b>1337</b>	<b>20.4805</b>	<b>4.1</b>	<b>0.0911</b>	<b>5.2</b>	<b>0.0135</b>	<b>3.2</b>	<b>0.62</b>	<b>86.6</b>	<b>2.8</b>	<b>88.5</b>	<b>4.4</b>	<b>139.5</b>	<b>96.0</b>
15	<b>150</b>	<b>1.7</b>	<b>834</b>	<b>20.4575</b>	<b>4.4</b>	<b>0.0938</b>	<b>4.5</b>	<b>0.0139</b>	<b>1.1</b>	<b>0.23</b>	<b>89.1</b>	<b>0.9</b>	<b>91.0</b>	<b>4.0</b>	<b>142.1</b>	<b>103.9</b>
16	385	1.8	986	18.4911	15.9	0.0744	16.1	0.0100	2.6	0.16	64.0	1.7	72.8	11.3	374.4	360.1
17	442	1.7	4705	20.3109	5.9	0.0670	6.3	0.0099	2.2	0.35	63.3	1.4	65.8	4.0	159.0	137.8
18	<b>2343</b>	<b>1.3</b>	<b>8304</b>	<b>20.0648</b>	<b>2.5</b>	<b>0.1761</b>	<b>4.8</b>	<b>0.0256</b>	<b>4.1</b>	<b>0.86</b>	<b>163.1</b>	<b>6.6</b>	<b>164.7</b>	<b>7.3</b>	<b>187.5</b>	<b>58.1</b>
19	<b>1692</b>	<b>0.6</b>	<b>18379</b>	<b>19.9960</b>	<b>1.3</b>	<b>0.1909</b>	<b>1.9</b>	<b>0.0277</b>	<b>1.3</b>	<b>0.72</b>	<b>176.0</b>	<b>2.3</b>	<b>177.4</b>	<b>3.0</b>	<b>195.4</b>	<b>30.0</b>
<i>LAa: Andesita Los Alisos</i>																
1	490	1.4	3325	20.7397	2.9	0.0762	3.2	0.0115	1.2	0.38	73.5	0.9	74.6	2.3	109.9	69.1
2	276	1.2	1739	20.0932	5.4	0.0788	5.5	0.0115	1.0	0.18	73.6	0.7	77.0	4.1	184.2	127.0
3	147	0.9	1116	18.6820	13.6	0.0913	13.7	0.0124	1.1	0.08	<b>79.2</b>	0.9	88.7	11.6	351.2	309.2
4	386	1.6	2306	20.5925	3.1	0.0760	3.4	0.0114	1.4	0.41	72.8	1.0	74.4	2.4	126.7	72.9
5	175	1.6	1432	19.2426	9.8	0.0814	10.0	0.0114	1.7	0.17	72.8	1.2	79.4	7.6	284.0	225.7
6	289	1.1	876	20.0791	5.2	0.0784	6.0	0.0114	3.1	0.51	73.2	2.2	76.6	4.4	185.8	120.4
7	144	1.0	979	19.1656	10.4	0.0840	10.9	0.0117	3.1	0.29	74.8	2.3	81.9	8.6	293.1	238.8
8	648	0.7	3051	20.6479	2.5	0.0768	2.7	0.0115	1.0	0.38	73.8	0.7	75.2	1.9	120.4	57.9
9	780	1.2	6054	20.8868	1.2	0.0773	2.7	0.0117	2.4	0.89	75.1	1.8	75.6	2.0	93.2	29.1
10	162	0.8	1168	19.4051	8.7	0.0819	8.8	0.0115	1.5	0.17	73.8	1.1	79.9	6.8	264.7	199.8
11	270	0.9	1622	19.9703	5.5	0.0779	5.9	0.0113	2.1	0.35	72.3	1.5	76.2	4.3	198.4	127.9
12	583	2.3	3031	20.8226	2.7	0.0771	3.1	0.0116	1.5	0.50	74.7	1.1	75.5	2.2	100.5	62.7
13	124	1.4	1015	18.6841	12.7	0.0864	12.8	0.0117	1.4	0.11	75.0	1.1	84.1	10.3	351.0	287.7
14	538	1.2	5696	20.6664	2.4	0.0766	2.7	0.0115	1.3	0.48	73.6	1.0	75.0	2.0	118.2	55.8
15	239	0.9	2305	20.4716	4.9	0.0781	5.3	0.0116	1.8	0.34	74.3	1.3	76.3	3.9	140.5	116.2
16	369	1.9	2218	20.6262	3.4	0.0757	4.0	0.0113	2.0	0.51	72.6	1.5	74.1	2.8	122.8	80.3
17	306	1.4	2050	20.3316	4.9	0.0775	5.0	0.0114	1.0	0.20	73.2	0.7	75.8	3.6	156.6	114.1
18	543	1.5	4168	20.7378	3.0	0.0763	3.7	0.0115	2.2	0.59	73.6	1.6	74.7	2.7	110.1	70.6
19	164	0.6	1384	20.0021	7.5	0.0794	7.6	0.0115	1.3	0.17	73.8	0.9	77.6	5.7	194.7	175.0
20	422	1.8	3917	20.7618	3.5	0.0786	4.0	0.0118	2.0	0.50	75.9	1.5	76.9	2.9	107.4	81.5
21	107	0.8	1718	19.7349	8.0	0.0805	8.7	0.0115	3.4	0.39	73.9	2.5	78.6	6.5	225.9	184.3
22	522	1.2	2746	20.2054	4.7	0.0782	5.2	0.0115	2.3	0.43	73.4	1.7	76.4	3.9	171.2	110.4
23	173	1.4	1425	20.2980	5.7	0.0763	5.9	0.0112	1.5	0.25	72.0	1.0	74.7	4.2	160.5	133.5
24	125	0.7	1219	19.6969	8.8	0.0804	9.3	0.0115	2.9	0.31	73.7	2.1	78.6	7.0	230.3	204.5
25	278	1.0	842	20.0226	6.0	0.0789	6.1	0.0115	1.0	0.16	73.4	0.7	77.1	4.5	192.3	140.1
26	216	2.4	2931	19.9199	6.3	0.0795	6.6	0.0115	2.1	0.31	73.6	1.5	77.6	5.0	204.3	146.8
27	333	1.8	4097	20.5886	4.5	0.0782	4.9	0.0117	2.0	0.41	74.9	1.5	76.5	3.6	127.1	105.9
28	1159	1.7	6759	20.8456	1.8	0.0780	3.1	0.0118	2.5	0.81	75.6	1.9	76.2	2.3	97.9	43.6
29	230	1.2	1336	20.1697	5.0	0.0773	5.2	0.0113	1.1	0.21	72.5	0.8	75.6	3.8	175.3	117.8
30	644	1.0	3467	20.9110	3.7	0.0762	3.8	0.0116	1.0	0.26	74.1	0.7	74.6	2.7	90.4	86.6
31	958	1.9	7521	20.9471	1.6	0.0754	2.4	0.0115	1.9	0.76	73.5	1.4	73.8	1.7	86.3	37.5

continúa

Tabla 2 (continuación). Resultados de los análisis geocronológicos de U-Pb.

#	U (ppm)	Th/U	Relaciones y errores isotópicos								Edades aparentes (Ma)					
			$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{207}\text{Pb}$	$\pm$ (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm$ (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm$ (%)	error corr.	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm$ (Ma)	$^{206}\text{Pb}^*/^{207}\text{Pb}$	$\pm$ (Ma)
<i>LAp: Pórfido Los Alisos</i>																
1	356	2.1	4841	20.0658	6.1	0.0640	7.1	0.0093	3.5	0.50	59.7	2.1	63.0	4.3	187.3	143.2
2	491	1.1	4911	20.6083	4.2	0.0621	4.5	0.0093	1.4	0.31	59.6	0.8	61.2	2.6	124.9	99.6
3	625	0.9	2484	20.2063	6.6	0.0651	7.2	0.0095	3.0	0.41	61.2	1.8	64.0	4.5	171.1	154.1
4	386	1.3	1410	20.7444	4.6	0.0608	4.7	0.0091	1.2	0.24	58.7	0.7	59.9	2.7	109.4	107.8
5	365	1.1	4020	20.3498	6.1	0.0638	6.2	0.0094	1.0	0.16	60.4	0.6	62.8	3.7	154.5	142.4
6	526	1.0	1662	20.5466	4.2	0.0629	4.4	0.0094	1.5	0.34	60.1	0.9	61.9	2.7	131.9	98.2
7	250	2.4	2734	20.0817	6.8	0.0645	6.9	0.0094	1.0	0.15	60.2	0.6	63.4	4.2	185.5	157.8
8	186	1.4	1836	19.9778	8.3	0.0644	8.7	0.0093	2.4	0.28	59.9	1.4	63.4	5.3	197.5	193.5
9	593	0.8	2392	20.2657	4.6	0.0646	4.7	0.0095	1.0	0.21	60.9	0.6	63.5	2.9	164.2	106.9
10	317	1.3	4740	19.8329	7.5	0.0649	7.6	0.0093	1.3	0.17	59.9	0.8	63.9	4.7	214.4	172.8
11	480	1.6	4376	20.5640	4.8	0.0628	5.2	0.0094	2.1	0.40	60.1	1.2	61.8	3.1	129.9	112.0
12	480	1.2	3563	20.3360	5.2	0.0648	5.3	0.0096	1.0	0.19	61.3	0.6	63.7	3.3	156.1	122.5
13	381	1.2	2195	20.1421	5.3	0.0653	5.4	0.0095	1.2	0.21	61.2	0.7	64.2	3.4	178.5	124.2
14	415	1.3	846	17.7844	20.2	0.0725	20.4	0.0094	3.0	0.15	60.0	1.8	71.1	14.0	461.4	451.3
15	465	1.2	2808	20.3287	4.9	0.0632	5.0	0.0093	1.0	0.20	59.8	0.6	62.2	3.0	157.0	114.6
16	225	0.8	1965	20.5135	4.3	0.0632	4.5	0.0094	1.0	0.22	60.4	0.6	62.3	2.7	135.7	102.2
17	331	1.2	2009	20.0439	6.9	0.0643	7.0	0.0093	1.4	0.20	60.0	0.8	63.3	4.3	189.9	160.6
18	258	1.2	3136	20.5928	4.3	0.0629	5.7	0.0094	3.8	0.67	60.3	2.3	61.9	3.4	126.7	100.1
19	398	1.0	2289	19.8375	6.9	0.0653	7.1	0.0094	1.5	0.21	60.3	0.9	64.2	4.4	213.9	161.1
20	265	1.5	2507	19.9354	6.5	0.0657	6.7	0.0095	1.7	0.25	61.0	1.0	64.6	4.2	202.5	151.2
21	469	2.6	9241	20.7799	3.4	0.0621	3.6	0.0094	1.2	0.34	60.0	0.7	61.1	2.1	105.3	79.5
22	524	1.1	2467	20.6365	3.8	0.0617	4.2	0.0092	1.8	0.42	59.3	1.1	60.8	2.5	121.7	90.1
23	318	1.6	1776	20.2954	4.8	0.0631	5.0	0.0093	1.4	0.28	59.6	0.8	62.1	3.0	160.8	113.2
24	185	1.3	1131	20.1399	6.1	0.0629	6.8	0.0092	2.9	0.42	59.0	1.7	61.9	4.1	178.7	143.4
25	265	1.2	1771	20.3112	4.4	0.0636	4.7	0.0094	1.6	0.33	60.1	0.9	62.6	2.8	159.0	103.3
26	495	1.3	4505	20.9394	3.0	0.0616	3.1	0.0093	1.0	0.32	60.0	0.6	60.7	1.8	87.2	70.5
27	666	1.0	1902	20.8152	3.2	0.0616	4.0	0.0093	2.4	0.61	59.7	1.4	60.7	2.3	101.3	74.8
28	156	1.5	1494	19.1394	10.4	0.0677	10.8	0.0094	2.9	0.27	60.3	1.7	66.5	7.0	296.3	238.2

La incertidumbre está reportada al nivel de 1 sigma, e incluye sólo errores de medición. Los errores sistemáticos incrementan la incertidumbre en la edad de 1 a 2%. La concentración de U y U/Th están calibradas de manera relativa con el NIST SRM 610 con una precisión de ~20%. La corrección del Pb común es del  $^{204}\text{Pb}$ , con composición interpretada de Stacey y Kramers (1975) y una incertidumbre de 1.0 para el  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , 0.3 para el  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , y 2.0 para el  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . El fraccionamiento de U/Pb y  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  está calibrada en relación a fragmentos del zircón Sri Lanka de  $564 \pm 4$  Ma (2-sigma). Las constantes de decaimiento del U y la composición asumidas son:  $^{238}\text{U}=9.8485 \times 10^{-10}$ ,  $^{235}\text{U}=1.55125 \times 10^{-10}$ ,  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.88$ . Texto en negritas: zircons heredados.

las edades tiene un error relativamente grande, como lo sugiere la elipse más amplia en el diagrama de concordia (Figura 11d), todos los datos fueron utilizados para calcular la edad promedio.

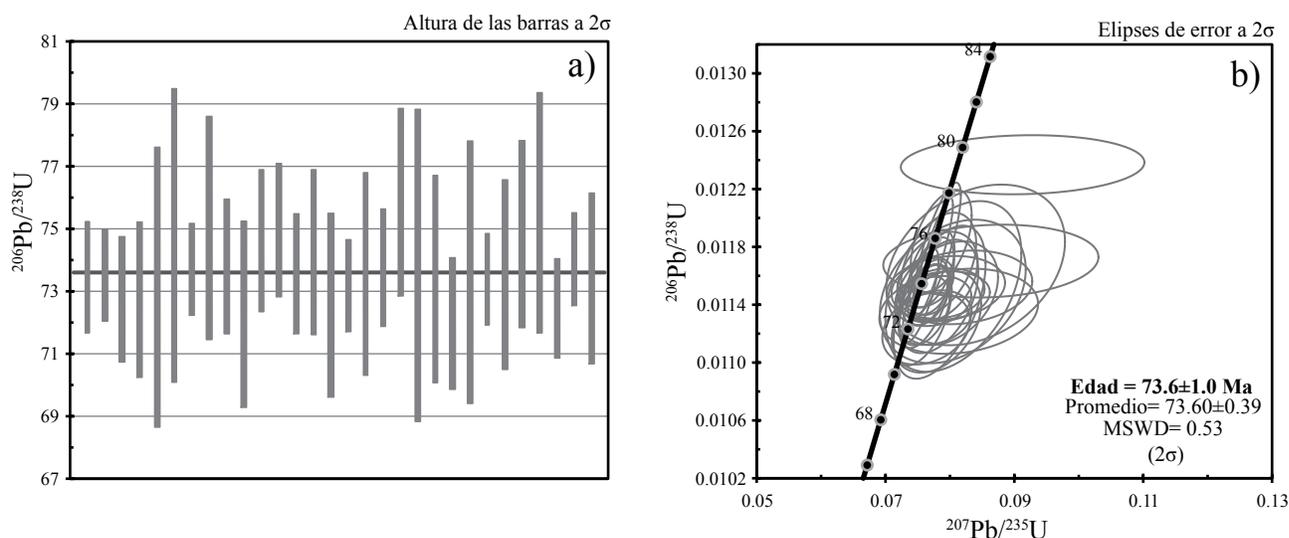
La Figura 12 muestra diagramas similares para las muestras colectadas en el área de la mina Pilares, donde se puede ver que las edades obtenidas son prácticamente idénticas, dentro del error analítico, para ambas muestras. La primera es una andesita basáltica denominada aquí "andesita Pilares" (AP), la cual indicó una edad media ponderada de  $64.3 \pm 0.8$  Ma ( $n=11$ ,  $2\sigma$ ) (Figuras 12a,b), excluyendo ocho edades que reflejan la presencia de zircons heredados. Aunque el número de datos utilizados para calcular esta edad es relativamente pequeño, los datos obtenidos para la otra muestra, denominada aquí "latita Pilares" (LP), arrojaron una edad media ponderada de  $64.2 \pm 0.8$  Ma ( $n=24$ ,  $2\sigma$ ) (Figuras 10c,d), excluyendo cinco datos que indican

herencias, lo cual constriñe de manera confiable la edad del pulso volcánico en la mina Pilares.

Haciendo un análisis de los datos provenientes de los zircons heredados, las edades calculadas para la latita Pilares indican un rango entre 1.61 y 1.42 Ga, mientras que para la andesita Pilares las edades más antiguas están entre 1.46 y 1.38 Ga (Tabla 2, Figuras 13a,b). En ambos casos se considera que los zircons provienen del basamento cristalino mesoproterozoico del noreste de Sonora, y más propiamente de la Provincia Mazatzal, de acuerdo con los estudios existentes para la reconstrucción del basamento de Sonora (e.g., Iriondo et al., 2004; Nourse et al., 2005).

La muestra de la latita Pilares indicó además la presencia de zircons con edades en el Triásico Medio (230 Ma), el Jurásico Medio (176 y 163 Ma) y el Cretácico Tardío (~78 a 89 Ma) (Tabla 3, Figura 13b), las cuales atestiguan la existencia de arcos magmáticos de esa edad

## Andesita Los Alisos



## Pórfido Los Alisos

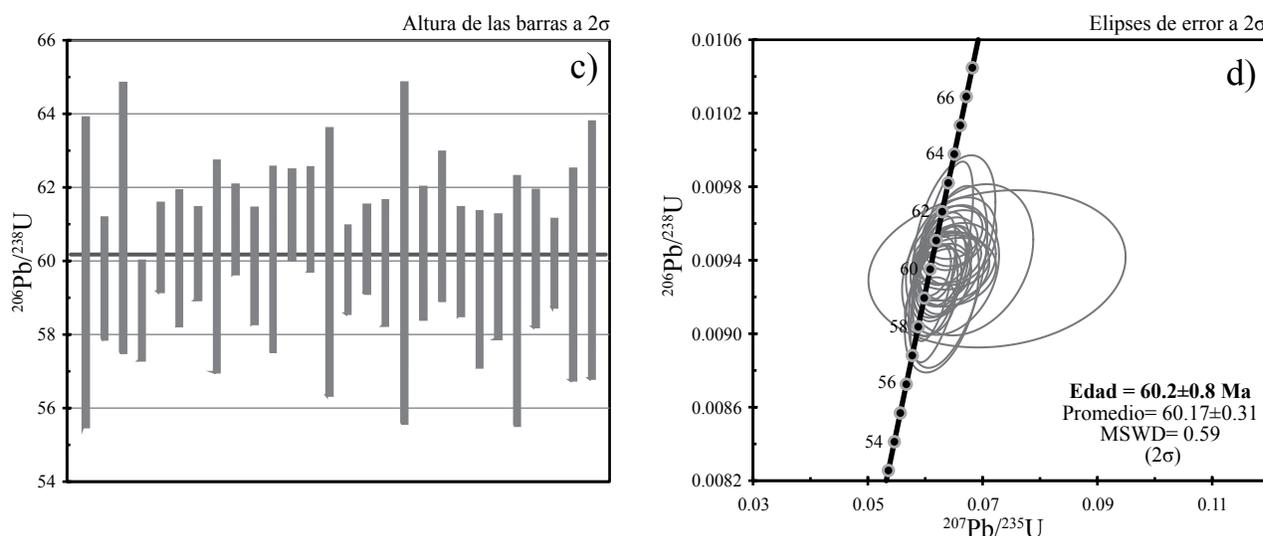


Figura 11. Gráficos de las relaciones U-Pb medidas para muestras del prospecto Los Alisos. a: Histograma de las edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  para la andesita Los Alisos, incluyendo 29 de 30 mediciones, con una edad media ponderada de  $73.60 \pm 0.4$  Ma. b: diagrama de concordia para la misma roca mostrando las elipses de error. La elipse más superior representa la edad excluida en (a). En las figuras (c) y (d) se muestran diagramas similares para el pórfido cuarzofeldespático de Los Alisos, cuya edad media ponderada indicó  $60.17 \pm 0.3$  Ma en 28 mediciones. Las edades mostradas en letras negras son considerando el tamaño del error propagado.

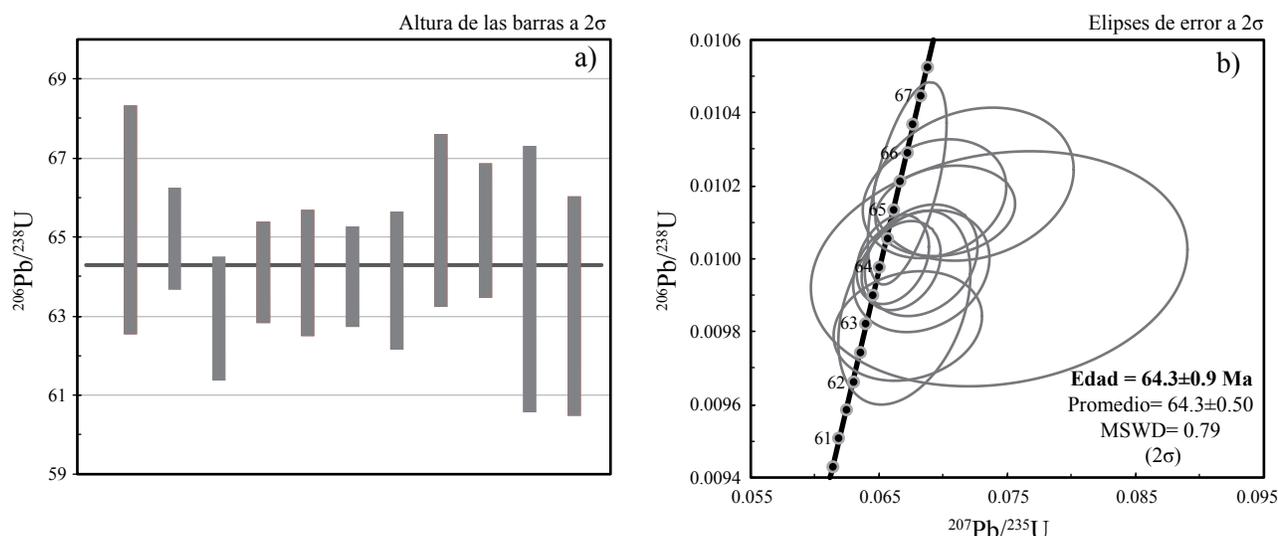
en esta parte del país. Para las otras muestras no se obtuvieron zirrones heredados, quizás debido a una selección más homogénea de los zirrones separados.

### CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS MAGMÁTICAS DEL DISTRITO DE LA CARIDAD

A pesar de que los depósitos de pórfido de cobre del noroeste de México son en general contemporáneos, existen variaciones metalogénicas a lo largo del cinturón

laramídico, las cuales podrían estar relacionadas a la asimilación de componentes corticales con diferentes cocientes metálicos (e.g., Tittley, 1991; Valencia-Moreno *et al.*, 2006). Para caracterizar la composición del pórfido de Los Alisos y compararla con la de otros sitios dentro del distrito de La Caridad, se colectaron y analizaron ocho muestras, cuya composición de elementos mayores y elementos traza se presenta en las Tablas 3 y 4, respectivamente. Estas muestras se presentan en distintos diagramas de clasificación, donde se compara su composición relativa a un espectro más amplio de rocas plutónicas, el cual se considera representativo del evento magmático Larámide en Sonora.

Andesita Pilares



Latita Pilares

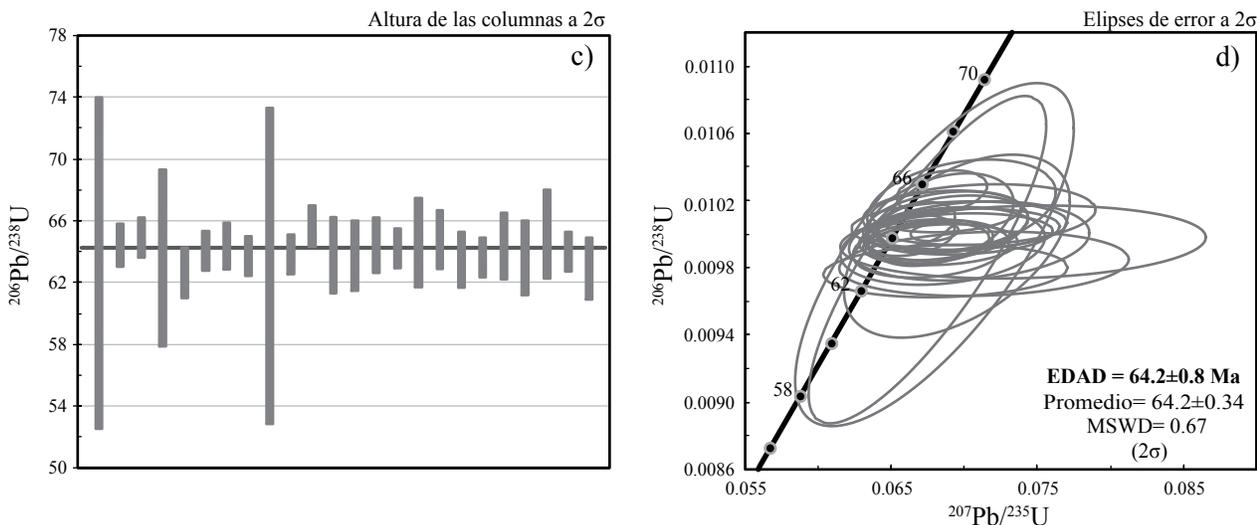


Figura 12. Gráficos de las relaciones U-Pb medidas para muestras del área de la mina Pilares. Histograma (a) y diagrama de concordia (b) de las edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  obtenidas para la andesita Pilares. En este caso se incluyeron 11 de 19 mediciones, las cuales arrojaron una edad media ponderada de  $64.3 \pm 0.5$  Ma. Las ocho edades excluidas en el cálculo de la edad promedio corresponden a zircones heredados. En las figuras (c) y (d) se muestran diagramas similares para la latita Pilares, cuya edad media ponderada indicó  $64.2 \pm 0.3$  Ma en 24 mediciones. En este caso se excluyeron un total de cinco edades las cuales representan herencias.

Los elementos mayores y algunos traza, a excepción de los elementos de las tierras raras, se realizaron por fluorescencia de rayos X utilizando un espectrómetro secuencial de rayos X Siemens SRS 3000, equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 125 micras, instalado en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en la Ciudad de México. Los elementos del grupo de las tierras raras (REE) se analizaron en el Laboratorio Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) del Instituto de Geofísica de la UNAM, utilizando un espectrómetro de masas modelo PQ3 de VGElemental.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en general se puede ver que existe una disminución en el contenido de todos los óxidos de elementos mayores con respecto al sílice, con la excepción del  $\text{K}_2\text{O}$  que aumenta sistemáticamente (Figura 14). Tres de las muestras estudiadas tienen valores de sílice más altos que el espectro de referencia; sin embargo, se puede ver que la concentración de los óxidos de Al, Fe, Ca, K y P de las rocas del distrito de La Caridad siguen una tendencia muy similar a éste. En los casos del  $\text{TiO}_2$  y el  $\text{MgO}$ , la concentración de las rocas estudiadas es relativamente más alta, y por el contrario, las concentraciones de  $\text{Na}_2\text{O}$ , aunque dispersas, son claramente más bajas,

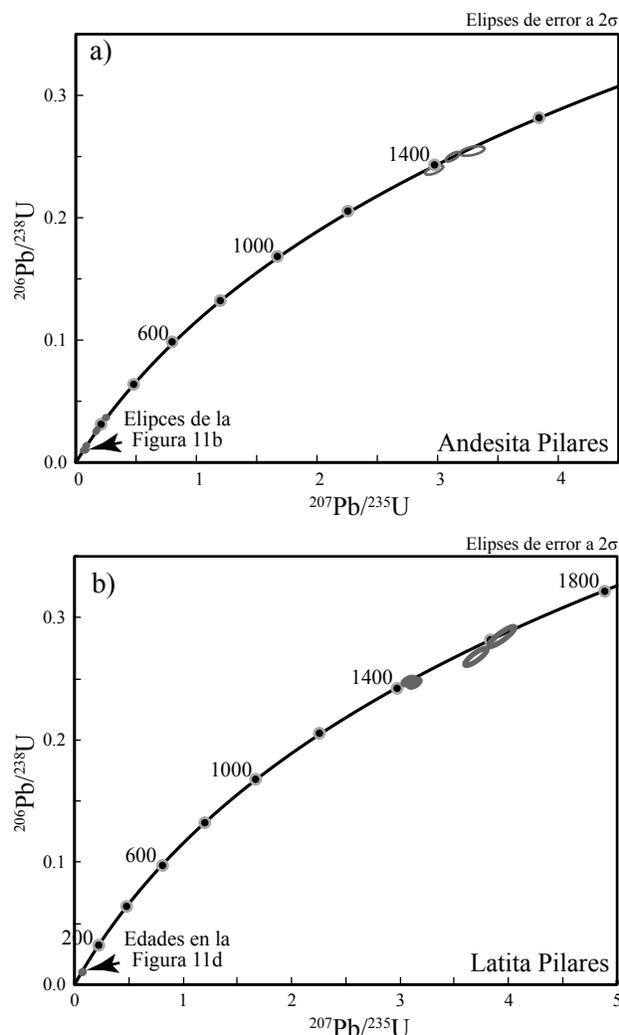


Figura 13. Diagramas de concordia mostrando la presencia de zircones heredados para las muestras del área de la mina Pilares. En el caso de la andesita Pilares (a) los zircones más antiguos indican edades entre 1.61 y 1.42 Ga, mientras que para la latita Pilares (b) las edades más antiguas tienen un rango entre 1.46 y 1.38 Ga. La latita Pilares contiene además herencias de zircones del Triásico Medio (230 Ma), Jurásico Medio (176 y 163 Ma) y del Cretácico Tardío (~78 a 89 Ma).

quizás debido a la remoción de cantidades importantes de  $\text{Na}^+$  durante la alteración hidrotermal.

En un diagrama QAP (Figura 15a), la composición de las rocas estudiadas cae en el campo de los granitos, aunque se observa cierta tendencia a alejarse del vértice rico en plagioclasa (P), la cual, a excepción de la granodiorita de La Caridad (LC-1), parece coincidir con un aumento en el sílice. Este grupo de rocas describe una tendencia típicamente calcialcalina que coincide en gran medida con el espectro de referencia, exceptuando las muestras de los depósitos de Florida-Barrigón y Bella Esperanza, cuya concentración de MgO es relativamente más alta (Figura 15b). Por otra parte, todas las muestras se ubican dentro del campo de rocas calcialcalinas de K alto, mientras que las

rocas del espectro se extienden también hacia el campo de rocas calcialcalinas de K medio (Figura 15c). En términos de grado de saturación en alúmina, las rocas del distrito de La Caridad son fuertemente hiperaluminosas, a excepción de las muestras de Los Alisos y Bella Esperanza, cuya composición está cerca del límite metaluminoso-hiperaluminoso (Figura 15d). Incluso, las muestras de la mina Pilares salen fuera de la figura hacia composiciones extremadamente hiperaluminosas, seguramente como resultado de la alteración hidrotermal.

En cuanto a la concentración de algunos de los elementos traza de las muestras estudiadas, la Figura 16 muestra que el Sr, Ce, Zr, Nb y V presentan correlaciones negativas respecto al sílice, al contrario que el Rb, Y y Ba. A excepción del Sr, el arreglo lineal es marcado en el resto de los elementos considerados en esta figura. Sin embargo, existen una o dos muestras que no siguen la tendencia esperada, aunque no se trata de las mismas muestras en cada caso. En esta figura se hace más difícil establecer una comparación entre las rocas estudiadas y el espectro de plutones laramídicos empleado antes, debido a su rango más restringido del sílice. No obstante, si se extiende de manera razonable el espectro hacia la derecha, se puede predecir que hay un enriquecimiento relativo en Ce, Y, Zr y Nb en las rocas estudiadas.

En un diagrama de discriminación tectónica del tipo Pearce, se puede observar que las muestras tienen una clara afinidad con los granitos de arco volcánico, al igual que las rocas del espectro de referencia (Figura 17). Sin embargo, dos de las muestras del distrito de La Caridad salen de este patrón y se ubican en la zona de los granitos sincollisionales, por efecto de la alteración hidrotermal.

Por otra parte, una característica geoquímica importante de notar aquí es el comportamiento de las tierras raras (REE). En trabajos previos se ha observado que los plutones laramídicos que intrusieron rocas del basamento norteamericano, presentan altas concentraciones en tierras raras ( $\Sigma\text{REE}$ ) y patrones normalizados a condrita enriquecidos en REE ligeras (LREE), con profundas anomalías negativas de Eu (Valencia-Moreno *et al.*, 2001). Estas características se observan también en los plutones laramídicos asociados a mineralización de Cu-Mo en Sonora, aunque en éstos, la anomalía negativa de Eu prácticamente desaparece e incluso cambia a una anomalía positiva (Valencia-Moreno *et al.*, 2008). En el distrito de La Caridad, esta característica es marcada, incluyendo la muestra del pórfido de Los Alisos (Figura 18a).

Extendiendo el diagrama a un diagrama multielemental se puede apreciar una serie de indicadores que se repiten a manera de patrón en todas las muestras (Figura 18b). En particular resaltan los contenidos relativamente bajos en Sr, Nb, Ba, Ti y Yb, y altos en Rb, Th, Ce e Y, lo cual es consistente con las características composicionales típicamente observadas en los granitoides emplazados en un ambiente de arco volcánico continental.

Tabla 3. Concentración de elementos mayores y mineralogía normativa de rocas intrusivas del distrito de Nacoziari.

( wt %)	LAp	LC	LCp	LP	LP-1	BE	BE-1	F-B
SiO <sub>2</sub>	58.51	67.46	69.59	76.80	77.59	67.65	74.58	71.80
TiO <sub>2</sub>	0.72	0.55	0.39	0.28	0.20	0.53	0.18	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.68	15.18	15.75	13.40	12.80	15.80	12.82	15.00
F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	4.93	3.93	3.81	1.67	0.93	3.71	0.95	0.88
MnO	0.15	0.05	0.03	0.00	0.01	0.06	0.04	0.06
MgO	1.67	1.60	1.42	0.43	0.31	1.50	1.34	0.92
CaO	4.76	3.03	0.06	0.04	0.06	3.23	1.27	1.66
Na <sub>2</sub> O	1.37	3.50	0.16	0.22	0.16	3.68	1.88	2.79
K <sub>2</sub> O	3.53	3.88	5.12	4.73	6.47	3.49	4.96	4.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.21	0.15	0.14	0.07	0.04	0.17	0.03	0.05
PxC	6.75	0.58	3.80	2.71	2.10	0.90	2.00	1.25
Suma	99.27	99.90	100.27	100.35	100.66	100.72	100.06	99.23
FeOt	4.44	3.54	3.43	1.50	0.84	3.34	0.86	0.79
#Mg	40.13	44.61	42.49	33.82	39.63	44.47	73.51	67.66
A/CNK	1.13	0.98	2.66	2.41	1.73	1.01	1.19	1.17
A/NK	2.75	1.52	2.71	2.44	1.76	1.61	1.51	1.54
Mineralogía normativa (CIPW)								
Cz	25.98	22.77	49.64	58.52	51.72	23.03	40.17	32.34
Pg	37.69	44.7	1.5	1.98	1.47	47.23	22.65	32.44
Or	25.33	25.28	34.67	31.55	41.63	22.78	32.09	30.87
C	1.75	-	7.19	5.42	3.63	0.2	1.31	1.46
Di	-	0.18	-	-	-	-	-	-
Hi	6.65	5.24	5.32	1.68	1.03	4.98	3.28	2.54
Ilm	0.87	0.6	0.45	0.31	0.22	0.58	0.2	0.03
Mt	1.24	0.9	0.92	0.39	0.21	0.84	0.22	0.2
Ap	0.46	0.3	0.29	0.14	0.08	0.34	0.06	0.1
Zr	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Análisis realizados por XRF en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM. PxC: pérdida por calcinación; FeOt: Fe total como FeO; #Mg: número de magnesio, equivalente a  $100 \times \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeOt})$ ; A/CNK: índice de saturación de alúmina, obtenido de la proporción molar de  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ; A/NK: proporción molar de  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ .

## GEOQUÍMICA ISOTÓPICA DE LAS ROCAS MAGMÁTICAS EN EL ÁREA DE LA CARIDAD Y LA ZONA DE LOS ALISOS

Un análisis de la composición isotópica del basamento y la distribución de los sistemas de pórfido de cobre en México fue realizada por Damon *et al.* (1983). En este trabajo, Damon y colaboradores notaron que las relaciones iniciales de Sr eran más altas en los pórfidos de cobre que fueron emplazados en una corteza subyacente por el basamento proterozoico norteamericano. Por el contrario, más al sur, donde el basamento está conformado por bloques exóticos que fueron progresivamente acrecionados al borde suroeste de Norte América, las relaciones de Sr fueron claramente más bajas. Posteriormente, Valencia-Moreno *et al.* (2001) ubicaron el borde sur del basamento norteamericano con base en un límite isotópico caracterizado por valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7060$  y  $\epsilon\text{Nd} = -3.4$ . Dicho límite cruza por el sur de Sonora en dirección aproximadamente E-W (Figura 1), y al parecer funcionó como un importante control metalogénico, que separa sistemas de pórfido de

cobre de mayor volumen dominados por mineralizaciones de Cu-Mo, hacia al norte, y depósitos relativamente menores de Cu-Au hacia el sur.

Con el fin de conocer la composición isotópica de los depósitos de pórfido de cobre del distrito de La Caridad, para tratar de dilucidar la naturaleza de la fuente del magma que produjo los plutones productivos, se realizaron mediciones de las relaciones isotópicas Rb-Sr y Sm-Nd, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5. Dichas mediciones se realizaron en el LUGIS de la UNAM utilizando un espectrómetro de masas Finnigan MAT-262. Los valores iniciales de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y  $\epsilon\text{Nd}$  más altos y más negativos (0.7024, -6.3), respectivamente, corresponden a la muestra del prospecto Florida-Barrigón. El valor de Sr menos radiogénico es el de la latita de Pilares (LP) con un valor de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$  de 0.7055, mientras que la granodiorita de la Caridad (LC) resultó ser la roca menos evolucionada en términos de  $\epsilon\text{Nd}$ , con un valor inicial de -3.7. En ambos casos, no existe mucha congruencia entre ambas sistemáticas, y no hay una razón lógica para tratar de encontrar fuentes distintas a las del resto del grupo, por lo que lo más probable es que todo se deba a

Tabla 4. Concentración en ppm de los elementos de las tierras raras y otros elementos traza en rocas intrusivas del distrito de Nacozari.

	LAp	LC	LCp	LP	P-1	BE	BE-1	F-B
La	36.03	33.80	14.59	23.27	-	28.84	37.65	30.85
Pr	8.51	7.82	3.32	4.79	-	7.10	7.47	6.56
Nd	32.98	29.23	12.26	17.09	-	27.67	26.33	24.75
Sm	5.79	5.67	2.38	2.93	-	5.05	4.76	4.48
Eu	1.58	1.38	0.83	1.15	-	1.65	1.18	1.32
Gd	4.45	4.62	2.08	2.24	-	3.97	3.83	3.39
Tb	0.57	0.67	0.31	0.26	-	0.55	0.54	0.45
Dy	2.93	4.07	1.84	1.42	-	3.07	3.12	2.71
Ho	0.53	0.85	0.39	0.29	-	0.62	0.66	0.54
Er	1.23	2.10	0.83	0.68	-	1.47	1.62	1.30
Tm	0.17	0.31	0.13	0.12	-	0.21	0.26	0.18
Yb	1.15	2.23	0.78	0.79	-	1.41	1.90	1.36
Lu	0.18	0.34	0.14	0.15	-	0.24	0.32	0.21
ΣREE	173.10	162.81	70.86	104.10	-	144.86	152.65	139.45
Eu <sub>N</sub> /Eu <sub>N</sub> *	0.96	0.83	1.16	1.39	-	1.14	0.85	1.05
Ce <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	17.88	8.39	10.62	16.60	-	11.96	8.91	12.13
Rb	182	210	423	253	331	110	202	187
Sr	165	364	18	68	98	481	336	403
Ba	819	871	434	1283	1290	985	1056	1004
Y	27	40	59	40	48	24	37	32
Zr	140	198	151	147	146	177	150	168
Nb	9	12	11	13	11	10	14	12
V	89	75	47	16	25	65	5	13
Cr	7	10	<2	<2	<2	4	<2	13
Co	9	8	5	6	7	7	6	7
Ni	8	9	3	5	5	8	6	6
Cu	1	515	810	4	135	7	37	28
Zn	360	87	67	6	100	54	75	37
Th	21	35	17	8	14	15	22	10
Pb	123	12	35	7	23	16	29	15

una desviación en las relaciones isotópicas motivada por los procesos de alteración hidrotermal, lo cual es prácticamente imposible de eliminar en un estudio de rocas magmáticas asociadas a sistemas de pórfido de cobre.

En un diagrama de correlación Sr-Nd se puede observar una clara afinidad de las rocas estudiadas con el grupo de granitoides laramídicos mostrados como referencia (Figura 19a). Estas rocas, a excepción de la latita Pilares, se ubican dentro de un cuadrante que se considera la región representativa de los granitoides frescos emplazados en una corteza subyacente por rocas del basamento proterozoico norteamericano, justo en la esquina alta de  $\epsilon\text{Nd}$  menos negativo y de Sr menos radiogénico del cuadrante (Figura 19a). Aunque no hay una tendencia lineal muy clara, la distribución de las muestras estudiadas sugiere un mayor involucramiento de corteza antigua en el caso de Florida-Barigón y una menor participación de ésta en la granodiorita de La Caridad.

Por otra parte, es interesante notar que las edades modelo basadas en la evolución del Nd en el manto empobrecido, reflejan una correlación inequívoca entre las rocas del distrito de La Caridad y los granitoides laramídicos, y su relación con las rocas proterozoicas del basamento norteamericano (Figura 19b). Dichas edades están en un

rango entre 0.95 y 1.09 Ga, lo cual indica un tiempo de residencia para el Nd que requiere la presencia importante de un componente cortical antiguo en la fuente del magma.

### Mineralización y alteración

El prospecto Los Alisos es un pórfido cuprífero relativamente pequeño, donde la mineralización hipogénica está muy pobremente expuesta. La alteración principal corresponde a propilitización de las andesitas. El pórfido mineralizante aflora en pequeñas zonas donde se puede observar el desarrollo de silicificación, ligada a una zona de fuerte oxidación jarosítica con parches de alteración argílica (Figura 20). La mineralización se encuentra localizada principalmente dentro de la zona oxidada y está dominada por la presencia de pirita diseminada asociada a vetillas de cuarzo, las cuales se encuentran rellenas fracturas (Figura 21). La mineralización consiste de pirita finamente cristalizada y parcialmente oxidada, lo cual produjo una coloración rojiza anómala que cubre gran parte del área de estudio (Figura 22). Dentro de esta anomalía de color existe un área con un mayor contenido de pirita fina euhédrica,

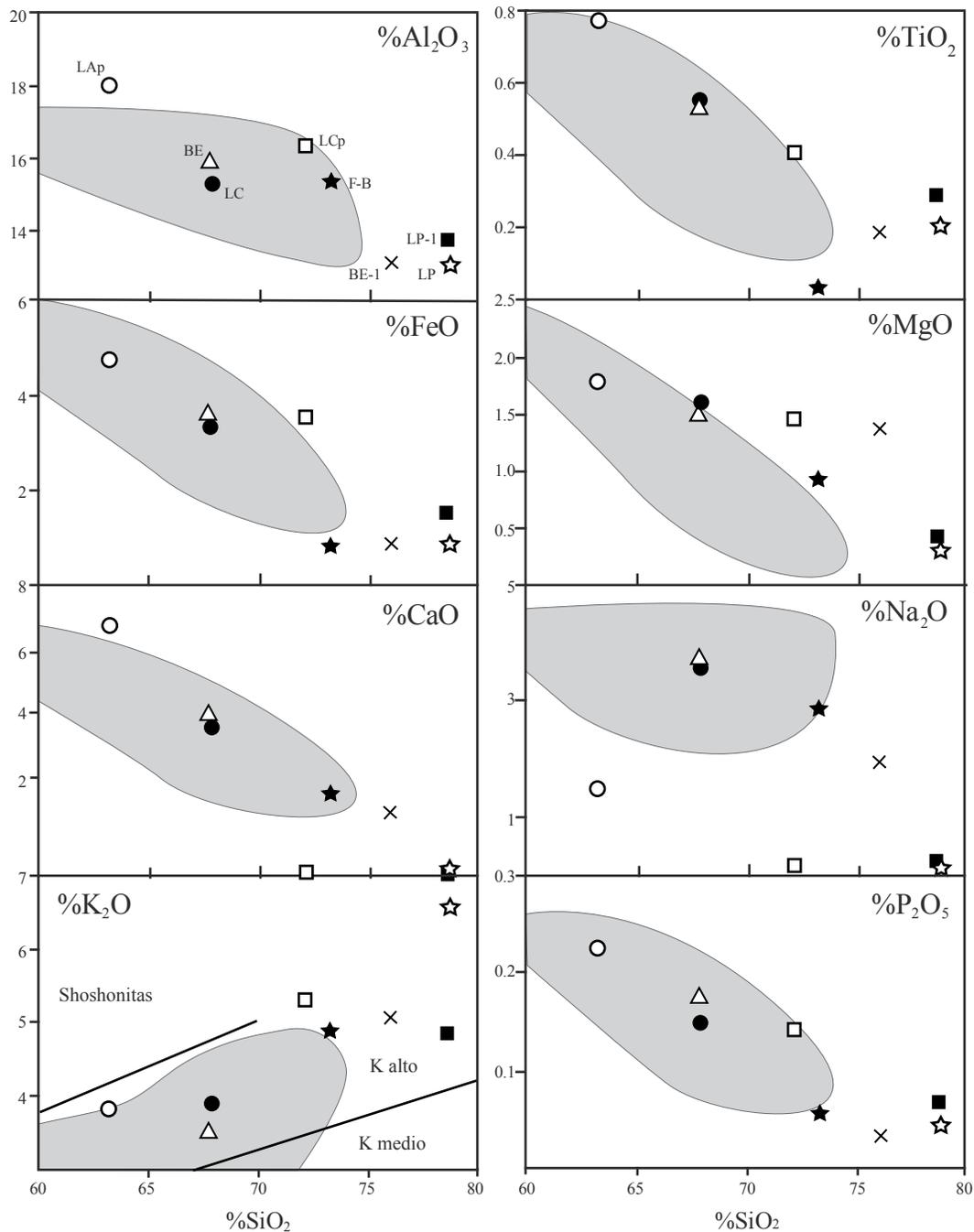


Figura 14. Diagramas de variación de sílice contra óxidos de elementos mayores para rocas de varias zonas mineralizadas del distrito de La Caridad. BE, BE-1: Bella Esperanza; F-B: Florida-Barrigón; LAp: pórfido cuarfeldespático Los Alisos; LC: granodiorita La Caridad; LCp: pórfido cuarzomonzonítico La Caridad; LP, LP-1: latita Pilares. Las concentraciones graficadas fueron recalculadas de la Tabla 3, sobre una base anhidra y normalizadas al 100%. El espectro de referencia es a partir de los datos publicados en Valencia-Moreno *et al.* (2001, 2003) para rocas plutónicas representativas del evento magmático Larámide en Sonora.

aunque en ocasiones se presentan cristales mayores de hasta 0.5 cm en tamaño, formando una concentración de hasta el 5% del volumen de la roca (Ramírez-Rubalcaba, 1970). La zona de pirita tiene una forma burdamente elíptica, con un eje mayor de aproximadamente 3,200 m de longitud y con dirección NE 50° SW, y un eje menor de unos 1,000 m de longitud (Figura 22). La mineralización es de tipo

hipogénico asociada genéticamente a un intrusivo porfídico que aflora sólo de manera local. A lo largo de toda el área se observan vetillas y vetas de cuarzo en una dirección preferencial NE-SW, conteniendo sulfuros primarios, particularmente pirita, calcopirita, esfalerita y galena. Sus dimensiones varían entre 30 m y 900 m de largo, mientras que sus espesores son de pocos centímetros hasta 1.5 m.

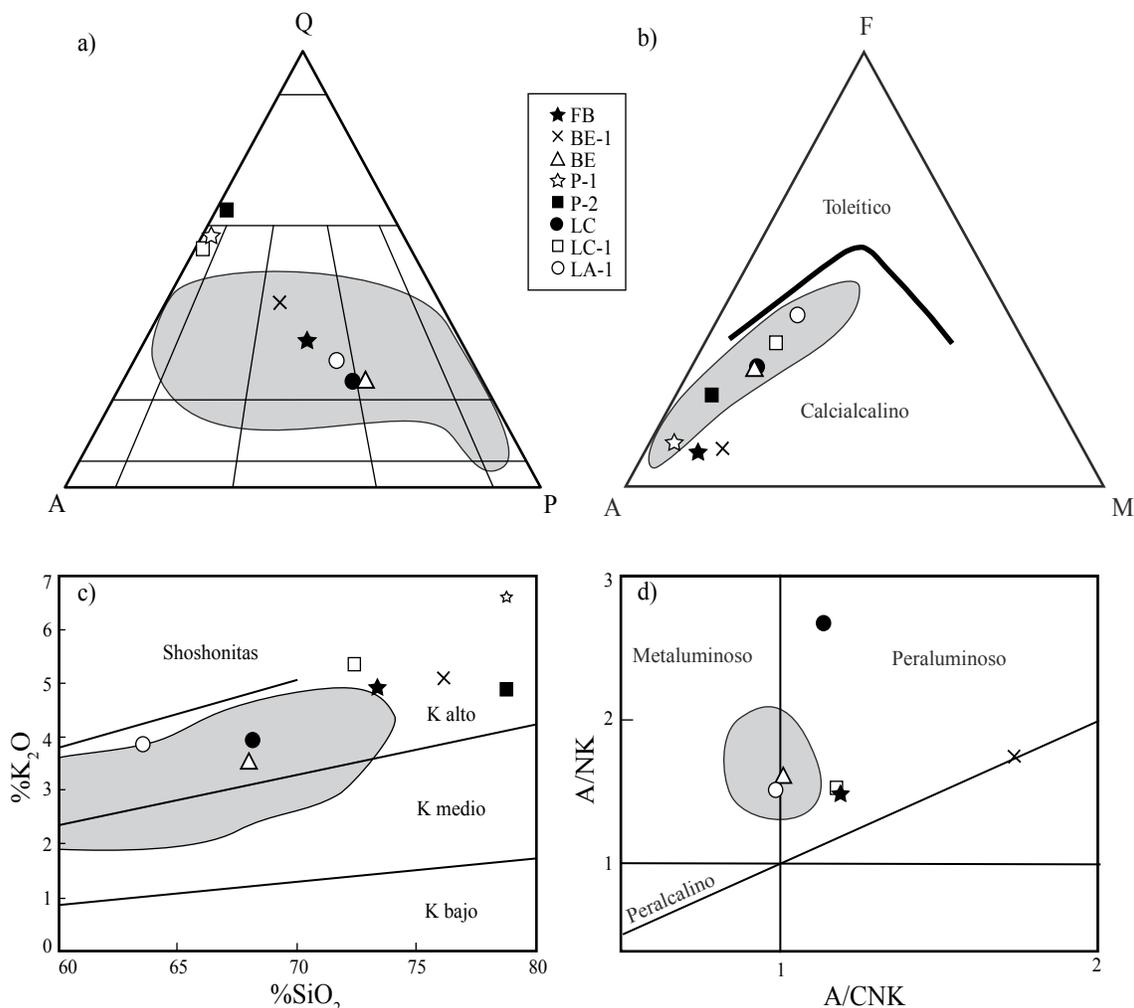


Figura 15. Diagramas de clasificación petrológica para las rocas estudiadas del distrito de La Caridad. (a) diagrama QAP (cuarzo-feldespatos alcalino-plagioclasa) con las divisiones de Streckeisen (1974); (b) diagrama AFM con la división entre las series toleíticas y calcicalcinalas propuesta por Irvine y Baragar (1971); (c) diagrama de variación de sílice contra potasio con las divisiones propuestas por Le Maitre (1989); (d) variación del índice de Shand de acuerdo con las divisiones propuestas por Maniar y Piccoli (1989). A/CNK: relación molar de  $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ .

Estas vetas han sido minadas de manera esporádica, quedando como testigo sólo obras menores de trabajos a muy pequeña escala, de las cuales destacan las minas de San Ignacio, La Amargosa y Minas Antiguas (Figura 22). En la zona San Ignacio, la estructura principal consiste de una veta de cuarzo de 0.58 m de ancho, con valores de 0.27 g/t de Au y 406 g/t de Ag. En Minas Antiguas, las vetas varían de 0.70 a 0.88 m de ancho, con promedio de 0.28 g/t de Au, 63 g/t a 161 g/t de Ag, y valores muy irregulares de Cu de 0.026% hasta 1.735%. En la mina La Amargosa, el espesor de las vetas de cuarzo va desde 0.50 a 0.95 m, con 0.19 a 3.11 g/t Ag, y 214 a 488 g/t Au respectivamente (Arreola-Razura y Roldán-Quintana, 1988).

Estudios petrográficos y paragenéticos en varias de las vetas de cuarzo del área reportados por Takeda *et al.* (1974), indican que además de la mineralización de Cu, Ag, Pb y Zn, algunas estructuras contienen fluorita y barita, que pudieran corresponder a una etapa posterior de tipo epitermal.

En general, la distribución espacial de las vetillas y vetas de cuarzo con Ag, Pb y Zn en el área de Los Alisos parece corresponder a un nivel superior dentro de un sistema de tipo pórfido de cobre, con una parte central más profunda, con un mayor contenido de pirita, de manera similar a lo que ha sido señalado por Titley (1982) para algunos depósitos del suroeste de Arizona en Estados Unidos. La alteración hipogénica en el área Los Alisos está profundamente enmascarada por la zona de coloración rojiza debida a la oxidación de los sulfuros (Figura 17). Localmente se observan halos de alteración compuestos principalmente de silicificación con óxidos de hierro en los costados de las estructuras, alcanzando sólo algunos milímetros a centímetros de ancho (Figura 18). En el área de Los Alisos se desconoce si existen condiciones para la generación de un enriquecimiento supergénico económico de cobre. Sin embargo, el Consejo de Recursos Naturales No Renovables en el año de 1969 confirmó con una serie de barrenos con broca de diamante,

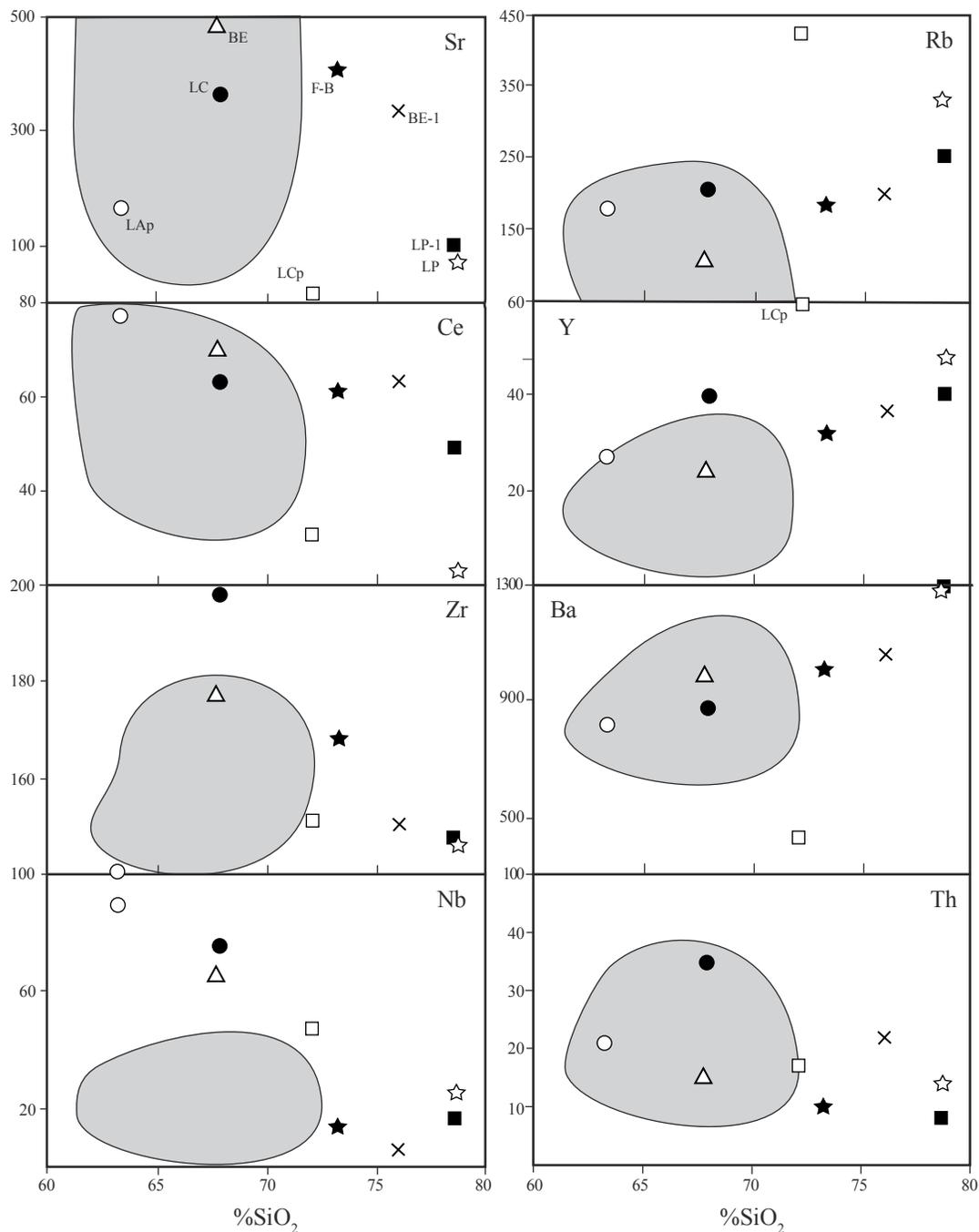


Figura 16. Diagramas de variación de sílice contra algunos elementos traza para rocas de varias zonas mineralizadas del distrito de La Caridad. Concentraciones en ppm de acuerdo a la Tabla 4.

que no hay definición de ningún horizonte de enriquecimiento en el área, sino sólo la zona de oxidación presente en superficie (Ramírez-Rubalcaba, 1970).

## DISCUSIÓN

Las nuevas edades U-Pb en zircones reportadas en este estudio, indicando  $73.6 \pm 1.0$  Ma para las rocas volcánicas

andesíticas y de  $60.2 \pm 0.8$  Ma para el pórfido cuarzofeldespático (Tabla 1), demuestran que la mineralización de Los Alisos corresponde al evento Larámide, al igual que las edades de  $64.2 \pm 0.8$  y  $64.3 \pm 0.8$  Ma reportadas para las rocas volcánicas de la mina Pilares (Tabla 1).

Las relaciones isotópicas caracterizadas por valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$  de 0.7067 y  $\epsilon\text{Nd}_i$  de -5.5, además de una edad modelo  $T_{\text{DM}}$  de 1.03 Ga obtenidas para el pórfido cuarzofeldespático de Los Alisos indican firmas asociadas a magmas

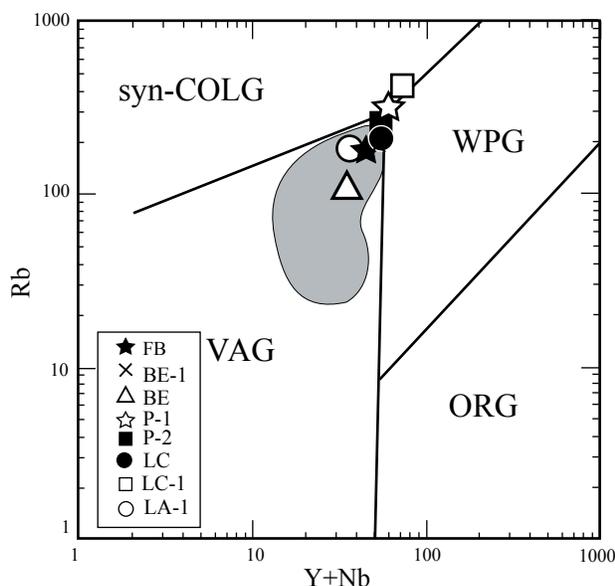


Figura 17. Diagrama de discriminación tectónica Rb-(Y+Nb) para las rocas estudiadas del distrito de La Caridad, con las divisiones propuestas por Pearce *et al.* (1984). VAG: granitos de arco volcánico; Syn-COLG: granitos sincollisionales; WPG: granitos intraplaca; ORG: granitos en zonas de dorsal oceánica.

modificados por la asimilación de rocas proterozoicas del cratón de Norte América y más específicamente de la provincia Mazatzal. Sus concentraciones de REE son compatibles con la composición general obtenida para los intrusivos productores en los sistemas de pórfido cuprífero en esta región, caracterizados por patrones enriquecidos en LREE, y anomalías de Eu generalmente positivas. Aunque, como se puede apreciar en la Figura 18a, existe una inversión en

la anomalía de Eu, lo cual, de acuerdo con Valencia-Moreno *et al.* (2008), posiblemente se debió a que durante el proceso de formación de los magmas productivos se separó una fase mineral, que quizás corresponda a hornblenda, como los propusieron anteriormente Lang y Titley (1998) para algunos distritos de pórfido de cobre de Arizona, lo cual fraccionó de manera importante los REE, a excepción del Eu que permaneció en la fase líquida.

Además de los aspectos genéticos, la distribución y geometría actual de los depósitos de pórfido de cobre en el distrito de La Caridad estuvo notablemente controlada por la extensión terciaria. Los efectos de dicha extensión son muy marcados en esta región y están dominados por una tectónica de bloques, sin evidencias al parecer de estructuras de bajo ángulo asociadas a fallas de *detachment*, las cuales son comunes hacia el oeste en el cinturón de complejos con núcleo metamórfico. La extensión exhumó de manera diferencial las zonas mineralizadas separándolas en distintos *horsts* (Figura 4). Existe un *horst* en la parte occidental cuya mayor exhumación se refleja en la exposición de las rocas jurásicas de la Fm. Lily, intrusionadas por un cuerpo granodiorítico. En la parte central hay un *horst* más amplio donde se exponen niveles estructurales más altos en el sistema mineralizado, evidenciados por la presencia de intrusivos porfídicos, y un importante fracturamiento de la roca, con desarrollo de zonas de brecha y de *stockwork*, que facilitaron el enriquecimiento supergénico del cobre hipogénico. En la parte oriental de este *horst* se ubica la mina La Caridad, que contiene la fracción más importante de la mineralización de Cu-Mo del distrito. En la parte occidental del *horst* se ubica la mina Pilares, la cual se caracteriza por una estructura de brecha mineralizada que puede representar la parte superior del sistema de pórfido cuprífero (Sillitoe,

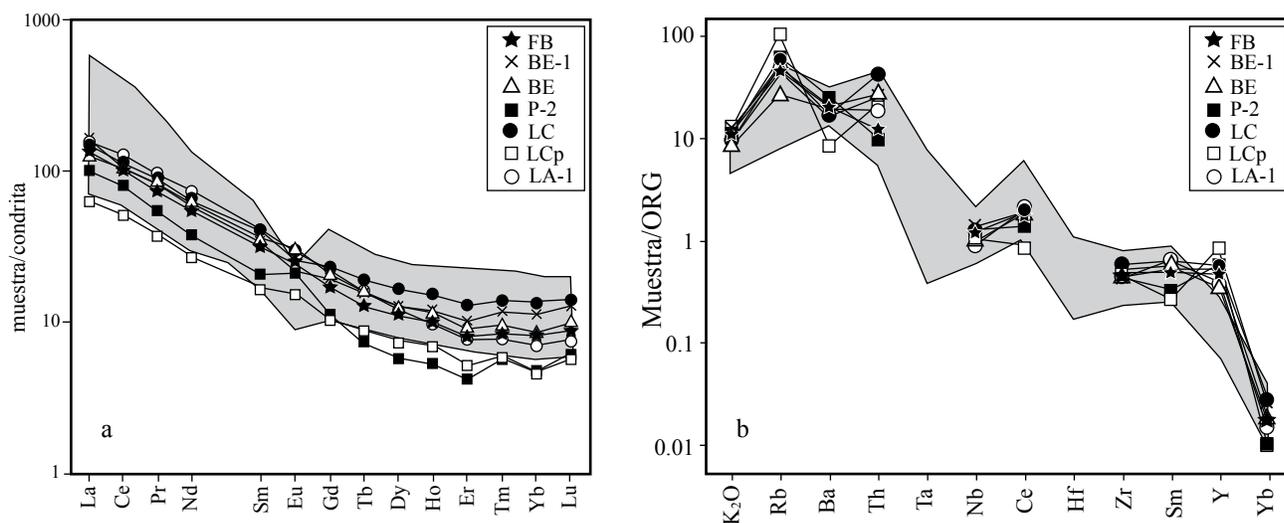


Figura 18. Diagramas multielementos para las rocas estudiadas del distrito de La Caridad. (a) Diagrama de elementos de las tierras raras normalizados a la condrita C1 Orgueil (Anders y Grevesse, 1989). (b) Diagrama multielemental normalizado a los valores hipotéticos propuestos por Pearce *et al.* (1984) para la composición de los granitos de dorsal oceánica. Todas las concentraciones fueron tomadas en ppm, excepto para el  $K_2O$  que se consideró en %. Los huecos en los patrones de las rocas estudiadas se deben a que no midieron las concentraciones de Ta y Hf.

Tabla 5. Relaciones isotópicas Rb-Sr y Sm-Nd de algunas de las muestras estudiadas.

Muestra	Edad (Ma)	Rb	Sr	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sub>i</sub>	2σ	Sm	Nd	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd <sub>i</sub>	2σ	εNd <sub>i</sub>	T <sub>DM</sub> (Ga)
BE*	55.9	112.18	457.97	0.709	0.707702	0.70714	10	4.86	26.34	0.112	0.512345	0.512304	6	-5.1	1.04
LC	55.5	211.27	350.30	1.745	0.708247	0.70687	11	5.50	29.32	0.113	0.512420	0.512379	4	-3.7	0.95
LCp	54.3	444.01	17.22	75.030	0.763485	0.70599	11	2.64	14.27	0.112	0.512345	0.512305	4	-5.1	1.04
LAp	60.2	146.90	146.00	2.912	0.709005	0.70652	10	5.38	30.39	0.107	0.512323	0.512281	5	-5.5	1.03
LP*	64.2	253.22	64.27	11.411	0.715922	0.70553	11	3.16	19.25	0.099	0.512289	0.512248	5	-6.0	1.00
F-B*	52.4	173.11	407.07	1.231	0.708155	0.70724	10	3.35	18.81	0.108	0.512285	0.512248	5	-6.3	1.09

Los análisis se realizaron utilizando un espectrómetro de masas Finnigan MAT 262 instalado en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM (LUGIS). Al momento en que se analizaron las primeras tres muestras, los valores del laboratorio para el estándar SRM987 y el estándar Nd la Jolla fueron de  $0.710235 \pm 18$  ( $n=229$ ) y  $0.511880 \pm 22$  ( $n=123$ ), respectivamente, mientras que para las otras tres muestras estos valores fueron de  $0.710238 \pm 23^*$  ( $n=347$ ) y  $0.511872 \pm 23$  ( $n=174$ ).

1973). Esto supondría una exhumación diferencial entre ambas partes debida a un basculamiento; sin embargo, consideramos que se trata más bien de un dislocamiento dentro del horst considerando que la brecha Pilares es vertical. Ello según los planos de levantamientos geológicos del interior de la mina Pilares y algunos barrenos en la mina La Caridad, que también presentan un comportamiento muy vertical de los intrusivos porfídicos (Valencia *et al.*, 2005). El horst de Los Alisos presenta una exhumación relativamente menor comparada con los otros dos. Este bloque está compuesto por rocas volcánicas laramídicas, mientras que el pórfido cuarzofeldespático reportado se presenta sólo en pequeñas apófisis que podrían sugerir la existencia de un cuerpo porfídico mayor localizado a una profundidad aún incierta.

CONCLUSIONES

El depósito de pórfido de cobre Los Alisos es parte de la importante zona mineralizada del distrito de La Caridad. Los nuevos datos U-Pb en zircones sugieren que el pulso mineralizante en Los Alisos fue ligeramente posterior a los  $60.2 \pm 0.8$  Ma, que es la edad de cristalización del pórfido cuarzofeldespático asociado a la mineralización, y que el magmatismo Larámide empezó en esta región al menos hace  $73.6 \pm 1.0$  Ma. Las dos muestras de roca volcánica de la mina Pilares fechadas por U-Pb en zircones en  $\sim 64$  Ma, contienen zircones heredados que sugieren la presencia de rocas con edades en el Mesoproterozoico, Triásico Medio, Jurásico Medio, y Cretácico Tardío pre-Larámide ( $\sim 89$  Ma) en el basamento intrusionado.

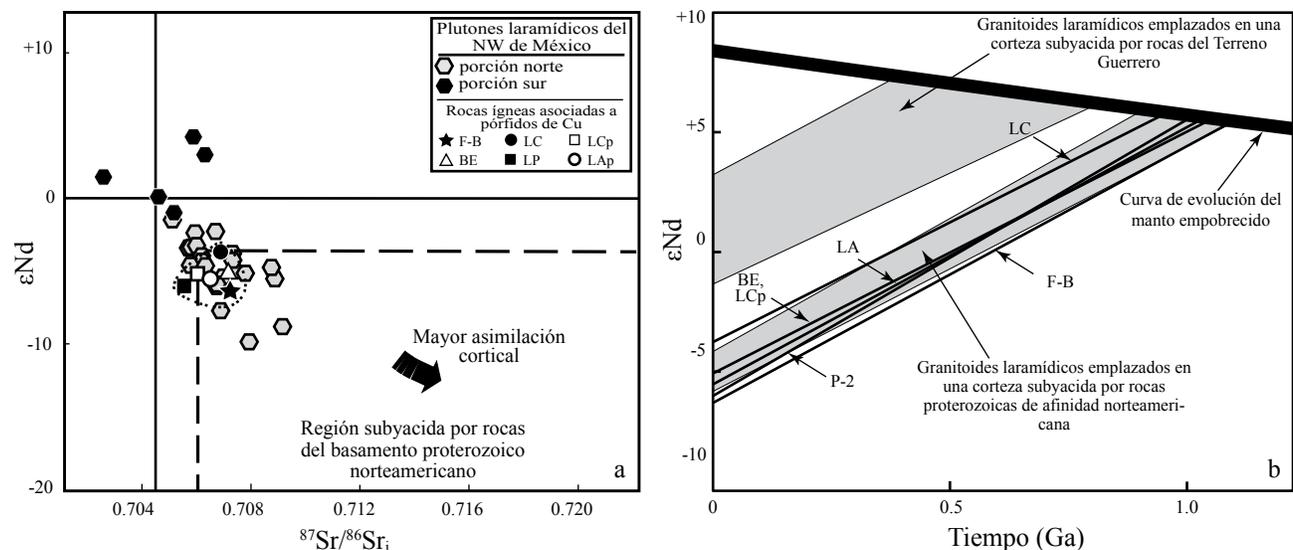


Figura 19. Diagrama de la composición isotópica de las muestras del distrito de La Caridad. (a) Diagrama de correlación isotópica Sr-Nd mostrando la distribución de las rocas estudiadas, comparadas con la composición de los granitoides laramídicos emplazados en una corteza subyacida por rocas proterozoicas de afinidad norteamericana (región entre las líneas punteadas) y otros que fueron emplazados en una corteza acrecionada de carácter más primitivo. El cruce de las líneas continuas indica el valor isotópico promedio estimado para la Tierra. La composición de los granitoides de referencia fue tomada de Valencia-Moreno *et al.* (2001, 2003) y Housh y McDowell (2005). (b) Edades modelo basadas en la evolución isotópica del Nd en el manto empobrecido, de acuerdo con DePaolo (1981), para las rocas del distrito de La Caridad. El espectro de referencia es de acuerdo con los datos en Valencia-Moreno *et al.* (2001).



Figura 20. Fotografía mostrando la intensa alteración cuarzo-sericita-pirita, la cual borró la textura y composición original de la roca. En la imagen se puede apreciar la presencia de óxidos de hierro del tipo jarosita ± hematita a partir de la oxidación de sulfuros primarios, así como zonas con aspecto de nódulos, que sugieren una composición félsica para la roca original.



Figura 21. Fotografía mostrando una vetilla de cuarzo con pirita de 1–2 cm de ancho que corta a una roca volcánica alterada a cuarzo-sericita-pirita, similar a la roca mostrada en la Figura 20. Este tipo de vetillas es común en el área del prospecto Los Alisos, incluso dentro de zonas de falla.

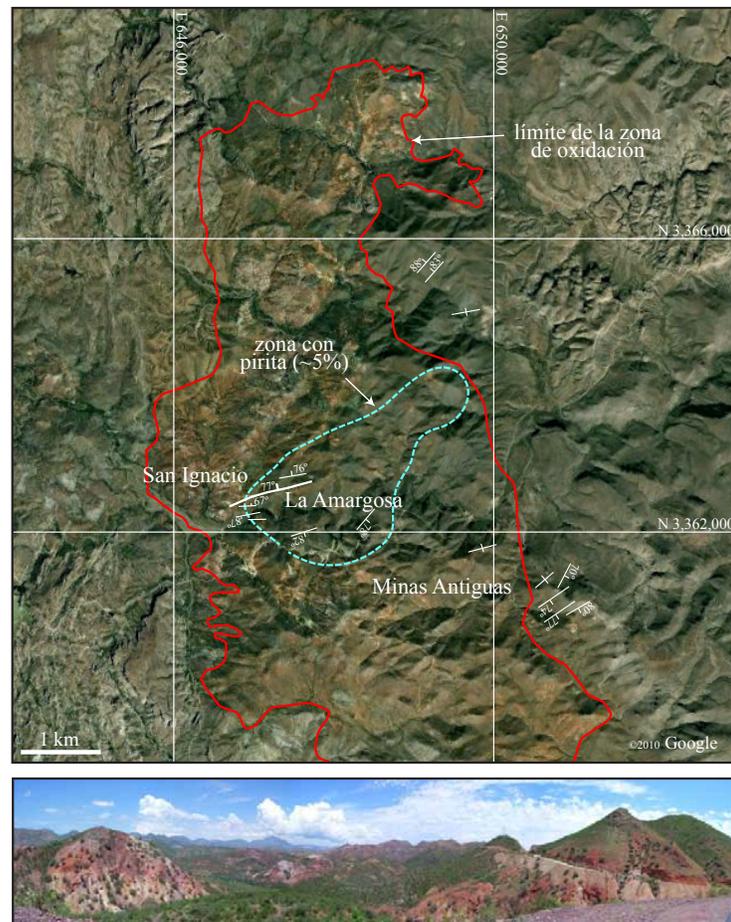


Figura 22. Aspecto de la zona de intensa oxidación del prospecto Los Alisos, delimitada en la imagen por la línea de color rojo. En la figura se muestran las distintas zonas mineralizadas mencionadas en el texto, donde hay evidencias de actividad minera a pequeña escala. La zona más importante corresponde a La Amargosa (delimitada por la línea punteada), donde la pirita alcanza hasta un 5% por volumen. Los rasgos estructurales marcados representan las principales vetas de cuarzo con sulfuros cuya orientación es en general NE-SW. La fotografía en la parte inferior es sólo para dar una idea más clara del aspecto de la zona oxidada en esta parte del distrito de La Caridad.

Estructuralmente, el prospecto de Los Alisos se localiza en un *horst* con una orientación hacia al norte, flanqueado por las fallas normales Alisos oeste y Alisos este (Fig 4). En contraste a las características metalogenéticas de la mina de La Caridad, donde la exhumación expuso el pórfido productivo y la mineralización hipogénica asociada a un vigoroso enriquecimiento supergénico, en Los Alisos se presume que el sistema mineralizado no logró exhumarse lo suficiente durante la extensión terciaria, y por consiguiente no alcanzó las condiciones adecuadas para generar su enriquecimiento supergénico.

Con los datos aportados en este trabajo se puede concluir que el prospecto de Los Alisos presenta las características propias de un sistema de tipo pórfido cuprífero. Sin embargo, la expresión relativamente limitada en superficie de su potencial metálico reduce mucho sus posibilidades económicas. Aunque existen barrenos cortos, la información actual es insuficiente para determinar las dimensiones de este prospecto. La información ofrecida en esta contribución podría enriquecerse con nuevos trabajos de geología estructural orientados a definir a con mayor detalle el patrón y la densidad de fracturas en las zonas más prometedoras, considerando que los intrusivos porfídicos son centros de calor capaces de inducir fracturamiento en la roca intrusionada. Este tipo de estudios, aunados a un mejor control geológico pudieran ayudar a definir nuevos objetivos para exploración directa, lo cual es crítico para tratar probar la existencia de un cuerpo mineralizado importante a profundidad, lo cual sería una posibilidad lógica a juzgar por la espectacular oxidación observada en esta zona.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es resultado parcial de la tesis de maestría del primer autor, quien agradece el apoyo brindado por la Compañía Mexicana de Cobre, S.A. de C.V., por todas las facilidades logísticas y el pago de los análisis para fechamiento U-Pb en zircones presentadas en este estudio. Especialmente agradece al Ing. Xavier García de Quevedo Topete, Presidente de Minera México y Presidente Ejecutivo de Southern Copper Minera México, y al Ing. Remigio Martínez Müller, Vice-Presidente de Exploraciones de Southern Copper Minera México y Director Corporativo de Exploración de Grupo México, por su aprobación para realizar este trabajo de tesis, y su apoyo en todo momento. Los autores desean expresar su sincero agradecimiento también al proyecto PAPIIT, DGAPA-UNAM IN116599 y al Proyecto de Grupo CONACYT 49528, bajo la responsabilidad de Martín Valencia Moreno, por el financiamiento de los estudios analíticos presentados en este trabajo, así como gran parte de los gastos de trabajo de campo.

Agradecemos sinceramente a Jonathan Nourse, Antoni Camprubí y Timothy Lawton por sus acertados comentarios y sugerencias, las cuales ayudaron grandemente a mejorar

esta contribución. Agradecemos también a todo el equipo de especialistas que participó en la obtención de los datos geoquímicos e isotópicos presentados en este trabajo. La concentración de los elementos mayores y algunos traza fueron realizados por XRF en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM (LUGIS) por Rufino Lozano Santacruz. La concentración de elementos de las tierras raras se midió en el Laboratorio de Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) del Instituto de Geofísica de la UNAM por Ofelia Morton Bermea y Elizabeth Hernández Álvarez. Las relaciones isotópicas Rb-Sr y Sm-Nd se analizaron en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM (LUGIS), con a la colaboración de Peter Schaaf, Gabriela Solís Pichardo, Juan Julio Morales Contreras, María del Sol Hernández Bernal y Teodoro Hernández Treviño. Los análisis de U-Pb en zircones fueron realizados comercialmente por Víctor Valencia en el *Arizona Laser ChronCenter* del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona.

## REFERENCIAS

- Aguilera-Schaufelberger, E., 1968, Levantamiento geofísico de polarización inducida y resistividad en el área de la mina "La Caridad", Nacoziari, Sonora: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 13 pp.
- Anders, E., Grevesse, N., 1989, Abundances of the elements: meteoric and solar: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 197-214.
- Anderson, J.L., Bender, E.E., 1989, Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States: *Lithos*, 23, 19-52.
- Anderson, T.H., Nourse, J.A., 2005, Pull-apart basins at releasing bends of the sinistral Late Jurassic Mojave-Sonora fault system, *en* Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B. (eds.), *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America, Special Paper 393*, 97-122.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1978, Jurassic magmatism in Sonora, Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, p. 359.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1981, An overview of Precambrian Rocks in Sonora: *Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología*, 5(2), 131-139.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 2005, The Mojave-Sonora megashear-Field and analytical studies leading to the conception and evolution of the hypothesis, *en* Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B. (eds.), *The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America, Special Paper 393*, 1-50.
- Anderson, T.H., Rodríguez-Castañeda, J.L., Silver, L.T. 2005, Jurassic rocks in Sonora, Mexico —relations to the Mojave-Sonora megashear and its inferred northwestward extension, *en* Anderson, T.H., McKee, J.W., Steiner, M.B. (eds.), *The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment, and alternatives: Geological Society of America, Special Paper 393*, 51-95.
- Arreola-Razura, L., Roldán-Quintana, J., 1988, Informe de la exploración por oro y plata desarrollada en el área "Los Alisos", Municipio de Villa Hidalgo, Sonora: Consejo de Recursos Minerales, Informe técnico, 56 pp.
- Arvizu, H.E., Iriondo, A., Izaguirre, A., Chávez-Cabello, G., Kamenov, G.D., Foster, D.A., Lozano-SantaCruz, R., Solís-Pichardo, G., 2009, Gneises banded paleoproterozoicos (~1.76-1.73 Ga) de la Zona Canteras-Puerto Peñasco: Una nueva ocurrencia de

- rocas de basamento tipo Yavapai en el NW de Sonora: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 61, 375-402.
- Atwater, T., 1970, Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America: Geological Society of America Bulletin, 81, 3513-3536.
- Atwater, T., Stock, J., 1998, Pacific-North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: An update: International Geology Review, 40(5), 375-402.
- Barton, M.D., Staude, J.M., Zürcher, L., Megaw, P.K.M., 1995, Porphyry copper and other intrusion-related mineralization in Mexico, *en* Pierce, F.W., Bolm, J.G. (eds.), Porphyry Copper Deposits of the American Cordillera: Arizona Geological Society Digest 20, 487-524.
- Bennett, V.C., DePaolo, D.J., 1987, Proterozoic crustal history of the western United States as determined by neodymium isotopic mapping: Geological Society of America Bulletin, 99, 674-685.
- Bilodeau, W., 1978, The Glimco Conglomerate, a lower Cretaceous syntectonic deposit in southeastern Arizona, *en* Callender J., Wilt, J., Clemons, R. (eds.), Land of Cochise, Southeastern Arizona: New Mexico Geological Society, 29th Field Conference.
- Bravo-Nieto, J., Romero-Martínez, S., 1967, Resumen de los trabajos de exploración por cobre en el área del Batamote, Son.: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 7 pp.
- Calmus, T., Amaya-Martínez, R., Roldán-Quintana, J., 2010, Libro guía de la excursión GeoLaramide, 4-5 de marzo, 26 pp.
- Campa, M.F., Coney, P.J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1040-1051.
- Camus, F., 2003, Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile, 267 pp.
- Coney, P.J., Reynolds, S.J., 1977, Cordilleran Benioff zones: Nature, 270, 403-406.
- Consejo de Recursos Minerales, 1992, Monografía geológico-minera del Estado de Sonora: Consejo de Recursos Minerales, 220 pp.
- Damon, P.E., Clark, K.C., Shafiqullah, M., 1983, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1052-1071.
- Davis, G.H., 1979, Laramide folding and faulting in southeastern Arizona: American Journal of Science, 279, 543-569.
- DePaolo, D.J., 1981, A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calcalkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California: Journal of Geophysical Research, 86(11), 10470-10488.
- Dilles, J.H., 1987, The petrology of the Yerington batholith, Nevada: Evidence for the evolution of porphyry copper ore fluids: Economic Geology, 82, 1750-1789.
- Era-Maptec Ltd., 1995, Remote Sensing and Structural analysis of La Caridad Mine and surrounding District, Northern Sonora: Mexicana de Cobre, Reporte interno, 34 pp.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica, *en* Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S.A., (eds.): Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen conmemorativo del Centenario, temas selectos 57(3), 343-378.
- González-León, C.M., 1988, Estratigrafía y geología estructural de las rocas sedimentarias cretácicas del área de Lampazos, Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 7, 148-162.
- González-León, C.M., 1994, Stratigraphy, depositional environments, and origin of the Cabullona basin, Northeastern Sonora, Mexico: Tucson, Arizona, University of Arizona, Ph. D. Thesis, 144 pp.
- González-León, C., Roldán-Quintana, J., Rodríguez, E.P., 1992, Deformaciones Sevier y Laramide: su presencia en Sonora: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Boletín, 9, 1-18.
- González-León, C.M., McIntosh, W.C., Lozano-Santacruz R., Valencia-Moreno, M., Amaya-Martínez, R., Rodríguez-Castañeda, J.L., 2000, Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi Quadrangles), northwest Mexico: Geological Society of America Bulletin, 112(4), 600-610.
- González-León, C.M., Valencia, V., Lawton, T.F., Leggett, W.J., Gehrels, G.E., Amato, J., Montijo-Contreras, O., Fernández, M.A., 2008, The Mesozoic detrital zircon geochronology of Sonora and paleogeographic implications, *en* 1er. Congreso sobre la Evolución Geológica y Ecológica del noroeste de México, Libro de resúmenes: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, 107-108.
- González-León, C.M., Valencia, V.A., López-Martínez, M., Bellon, H., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., 2010, Arizpe sub-basin: A sedimentary and volcanic record of Basin and Range extension in north-central Sonora, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 27(2), 292-312.
- González-León, C.M., Solari, L., Solé, J., Ducea, M.N., Lawton, T.F., Bernal, J.P., González Becuar, E., Gray, F., López Martínez, M., Lozano Santacruz, R., 2011, Stratigraphy, geochronology, and geochemistry of the Laramide magmatic arc in north-central Sonora, Mexico: Geosphere, 7(6), 1-27.
- Grajales-Nishimura, J.M., Terrell, D., Damon, P., 1992, Evidencias de la prolongación del arco magmático cordillerano del Triásico Tardío-Jurásico en Chihuahua, Durango y Coahuila: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 42(2) 1-18.
- Grijalva-Noriega, F.J., Roldán-Quintana, J., 1998, An overview of the Cenozoic tectonic and magmatic evolution of Sonora, northwestern Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 15(2), 145-156.
- Hayes, P., Drewes, H., 1978, Mesozoic depositional history of southeastern Arizona, *en* Callender, J., Wilt, J., Clemons, R. (eds.), Land of Cochise (Southeastern Arizona): New Mexico Geological Society, 29th Field Conference, 201-207.
- Henry, C.D., Aranda-Gómez, J., 1992, The real southern Basin and Range: mid to late Cenozoic extension in Mexico: Geology, 20, 701-704.
- Housh, T.B., McDowell, F.W., 2005, Isotope provinces in Laramide and mid-Tertiary igneous rocks of northwestern Mexico (Chihuahua and Sonora) and their relation to basement configuration, *en* Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B. (eds.), The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America, Special Paper 393, 671-692.
- Iriondo, A., Premo, W.R., Martínez-Torres, L.M., Budahn, J.R., Atkinson, W.W., Siems, D.F.Jr., Guarás-González, B., 2004, Isotopic, geochemical and temporal characterization of Proterozoic basement rocks in the Quitovac region, northwestern Sonora, Mexico: Implications for the reconstruction of the southwestern margin of Laurentia: Geological Society of America Bulletin, 116(1-2), 154-170.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of common volcanic rocks: Canadian Journal of Earth Sciences, 8, 523-548.
- Keith, S.B., Swan, M.M., 1995, Tectonic setting, petrology, and genesis of the Laramide porphyry copper cluster of Arizona, Sonora, and New Mexico, *en* Pierce, F.W., Bolm, J.G. (eds.), Porphyry copper deposits of the American Cordillera: Arizona Geological Society Digest, 20, 339-346.
- Lang, J.R., Tittley, S.R., 1998, Isotopic and geochemical characteristics of Laramide magmatic systems in Arizona and implications for the genesis of porphyry copper deposits: Economic Geology, 93, 138-170.
- Lawton, T.F., González-León, C.M., Amato, J.M., Gehrels, G.E., Heizler, M., Iriondo, A., Leggett, W.J., Mauel, D.J., Peryam, T.C., 2008, Contrasting tectonic regimes recorded by sedimentary basins associated with Jurassic and Cretaceous arc systems, Sonora, Mexico, *en* 1er. Congreso sobre la Evolución Geológica y Ecológica del noroeste de México, Libro de resúmenes: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, 105-106.
- Lee-Moreno, J.L., Osoria-Hernández, A., 1965a, Reconocimiento geoquímico y yacimientos minerales de la porción noreste del

- estado de Sonora, México: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 1 p.
- Lee-Moreno, J.L., Osoria-Hernández, A., 1965b, Informe preliminar sobre la anomalía geoquímica Cruz de Cañada: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 22 pp.
- Le Maitre, R.W., 1989, A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on systematics of igneous Rocks: Blackwell, Oxford, 193 pp.
- Leon, F., Miller, J., 1981, Opodepe molybdenum-copper porphyry deposit, *en* Ortlieb, L., Roldán-Quintana, J. (eds.), Geology of Northwestern Mexico and Southern Arizona: Geological Society of America, Cordilleran Section Annual Meeting, Field Guides and Papers, 223-238.
- Livingston, D.E., 1973, Geology, K-Ar ages and Sr isotopy at La Caridad, Nacozari district, Sonora, Mexico: Tucson, Arizona, University of Arizona, M.S. thesis, 31pp.
- Lonsdale, P., 1991, Structural patterns of the Pacific floor offshore of Peninsular California, *in* Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T. (eds.), The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists, 47, 87-125.
- Ludwig, K.R., 2003, User's manual for Isoplot/Ex, Version 3.0, A geochronological toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center, Special Publication 4, 70 pp.
- Lugo-Zazueta, R.E., 2006, Extensión Basin and Range en la Sierra de Aconchi, Sonora, México: Análisis Termocronológico Basado en Ar/Ar y Trazas de Fisión: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría, 77 pp.
- Luhr, J.F., Henry, C.D., Housh, T.B., Aranda-Gómez, J.J., McIntosh, W.C., 2001, Early extension and associated mafic alkalic volcanism from the southern Basin and Range Province: Geology and petrology of the Rodeo and Nazas volcanic fields, Durango, México: Geological Society of America Bulletin, 113(6), 760-773.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids: Geological Society of America Bulletin, 101(5), 635-643.
- McAnulty, W.N., 1970, Geology of the Northern Nacozari district, Sonora, Mexico: New Mexico, University of New Mexico, Ph.D. thesis, 103 pp.
- McDowell, F.W., Clabaugh, S.E., 1979, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico, *en* Chapin, C.E., Elston, W.E. (eds.), Ash-flow tuffs: Geological Society of America, Special Paper 180, 113-124.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 113(4), 521-531.
- McKee, M.B., Anderson, T.H., 1998, Mass-gravity deposits and structures in the Lower Cretaceous of Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 110(12), 1516-1529.
- Nourse, J.A., 2001, Tectonic insight from an Upper Jurassic-Lower Cretaceous stretched-clast conglomerate, Caborca-Altar region, Sonora, Mexico: Journal of South America Earth Sciences, 14(5), 453-474.
- Nourse, J., 2008, Precious and base metals exploration meets structural geology and tectonics along the Sonora Mineral Belt, northwestern Mexico: Newsletter of the Inland Geological Society, 24(8), 1-2.
- Nourse, J.A., 2010, Tectonic and structural setting of gold mineralization in the Sonora-Mojave belt: example from the Juarez-Tajitos area: American Association of Petroleum Geologists, Cordilleran Section, 106th Annual Meeting, and Pacific Section, Abstracts with Programs, 42, 108.
- Nourse, J.A., Anderson, T.H., Silver, L.T., 1994, Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico: Tectonics, 13(5), 1161-1182.
- Nourse, J.A., Premo, W.R., Iriondo, A., Stahl, E.R., 2005, Contrasting Proterozoic basement complexes near the truncated margin of Laurentia, Northwestern Sonora-Arizona international border region, *en* Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B. (eds.), The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393, 123-182.
- Osoria-Hernández, A., De la Campa-Jerez, G., 1966, Estudio geológico del área de La Caridad, municipio de Nacozari, Sonora: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 17 pp.
- Osoria-Hernández, A., Velasco-Hernández, J., 1968, Informe actualizado de geología, geoquímica, geofísica y perforación de la zona de asignación "La Caridad", Nacozari, Sonora: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 49 pp.
- Parsons, T., 1995, The Basin and Range province in continental rifts: Evolution, Structure, Tectonics, *en* Olsen, K.H. (ed.), Continental Rifts: Evolution, Structure, and Tectonics: Elsevier, Developments in Geotectonics 25, 277-324.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindall, A.G., 1984, Trace elements discriminations diagrams for the tectonic interpretations of granitic Rocks: Journal of Petrology, 25(4), 956-983.
- Pérez-Segura, E., Echávarri-Pérez, A., 1981, Carta Metalogenética de Sonora: Dirección de Minería, Geología y Energéticos del Gobierno del Estado de Sonora, 18 pp.
- Pierce, F.W., Bolm, J.G. (eds.), 1995, Porphyry Copper Deposits of the American Cordillera: Arizona Geological Society Digest, 20, 656 pp.
- Ramírez-Rubalcaba, J., 1970, Informe actualizado de las investigaciones efectuadas en el prospecto Los Alisos: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 24 pp.
- Rangin, C., 1978, Consideraciones sobre la evolución geológica de la parte septentrional del estado de Sonora: Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Libro guía del 1er Simposio sobre la Geología y Potencial Minero del Estado de Sonora, 35-36.
- Rehrig, W.A., 1986, Processes of regional Tertiary extension in the Western Cordillera; insights from the metamorphic core complexes, *en* Mayer, L., Extensional Tectonics of the Southwestern United States: A perspective on processes and kinematics: Geological Society of America, Special Paper 208, 97-122.
- Roldán-Quintana, J., 1991, Geology and chemical composition of El Jaralito and Aconchi batholiths in east-central Sonora, *en* Pérez-Segura, E., Jacques-Ayala, C. (eds.), Studies of Sonoran Geology: Geological Society of America, Special Paper 254, 19-36.
- Saegart, W.E., Sell, J.D., Kilpatrick, K., 1974, Geology and mineralization of La Caridad porphyry copper deposit, Sonora, Mexico: Economic Geology, 69, 1060-1077.
- Salas, G.P., 1975, Carta y provincias metalogenéticas de la República Mexicana: Consejo Recursos Minerales, Publicación 21E, 242 pp.
- Saleeby, S., 2003, Segmentation of the Laramide Slab —Evidence from the southern Sierra Nevada región: Geological Society of America Bulletin, 115, 655-668.
- Sillitoe, R.H., 1973, The tops and bottoms of porphyry copper deposits: Economic Geology, 68, 799-815.
- Sillitoe, R.H., 1976, A reconnaissance of the Mexican porphyry copper belt: Royal School of Mines of London, Department of Mining Geology, B170-B189.
- Silver, L.T., Chappell, B.W., 1988, The Peninsular Ranges Batholith: an insight into the evolution of the Cordilleran batholiths of southwestern North America: Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences 79, 105-121.
- Stewart, J.H., 1988, Latest Proterozoic and Paleozoic southern margin of North America and the accretion of Mexico: Geology, 16(2), 186-189.
- Stock, J.M., Lee, J., 1994, Do microplates in subduction zones leave a geological record?: Tectonics, 13(6), 1472-1487.
- Streckeisen, A.L., 1974, Classification and nomenclature of plutonic rocks. Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks: Geologische Rundschau, Internationale Zeitschrift für Geologie, 63, 773-785.
- Suter, M., Contreras, J., 2002, Active tectonics of northeastern Sonora, Mexico (Southern Basin and Range Province) and the 3 May 1887 Mw 7.4 earthquake: Bulletin Seismological of Society American, 92(2), 581-589.
- Takeda, H., 1974, Informe preliminar sobre el estudio geológico del prospecto Los Alisos en Nacozari, Sonora: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Informe técnico, 10 pp.

- Takeda, H., Amaya-Martínez, R., Arreola-Razura, L., 1974, Investigación geológico-minera sobre la mineralización de cobre en el prospecto de "Los Alisos", Mpio. de Nacozari, Edo. de Sonora: Consejo de Recursos Minerales No Renovables, Informe técnico.
- Titley, S.R. 1982, The Style and Progress of Mineralization and Alteration in Porphyry Copper Systems, *en* Titley, S.R. (ed.), *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits: Southwestern North America*: Tucson, AZ, University of Arizona Press, 93-116.
- Titley, S.R., 1991, Correspondence of ores of silver and gold with basement terranes in the American South-west: *Mineralium Deposita*, 26, 66-71.
- Titley, S.R., 2001, Crustal affinities of metallogenesis in the American Southwest: *Economic Geology*, 96, 1323-1342.
- Titley, S.R., Hicks, C.L. (eds.), 1966, *Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*: Tucson, University of Arizona Press, 287 pp.
- Torres-Vargas, R., Ruiz, J., Patchett, P.J., Grajales-Nishimura, J.M., 1999, Permo-Triassic continental arc in eastern Mexico: Tectonic implications for reconstructions of southern North America, *en* Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), *Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico*: Geological Society of America, Special Paper 340, 191-196.
- Valencia, V.A., Ruiz, J., Barra, F., Geherls, G., Ducea, M., Titley, S.R., Ochoa-Landín, L., 2005, 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, Mexico: *Mineralium Deposita* 40, 175-191.
- Valencia, V.A., Barra, F., Weber, B., Ruiz, J., Gehrels, G., Chesley, J., López-Martínez, M., 2006, Re-Os and U-Pb geochronology of the El Arco porphyry copper deposit, Baja California Mexico: Implications for the Jurassic tectonic setting: *Journal of South American Earth Sciences*, 22, 39-51.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M.D., Patchett, P.J., Zürcher, L., Hodkinson, D.G., Roldán-Quintana, J., 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: Identification of the southern edge of the North American Precambrian basement, *Geological Society of America Bulletin*, 113(11), 1409-1422.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Ochoa-Landín, L., Martínez-Serrano, R., Vargas-Navarro, P., 2003, Geochemistry of the Coastal Sonora batholith, Northwestern Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40, 819-831.
- Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., Pérez-Segura, E., 2006, Características metanogénicas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58, 1-26.
- Valenzuela-Navarro, L.C., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., Ochoa-Landín, L., González-León, C., 2005, Marco geológico del pórfido de molibdeno El Crestón, Sonora central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 345-357.
- Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., 2008, Análisis de los patrones de REE en plutones asociados al cinturón de pórfidos de cobre en Sonora y Sinaloa, *en* Valencia-Moreno, M., Vega Granillo, L., 1er Congreso sobre la Evolución Geológica y Ecológica del Noroeste de México, Libro de Resúmenes: Hermosillo, Sonora, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, Publicaciones Ocasionales #4, Abril 21-23, 37-38.
- Vega-Granillo, R., Calmus, T., 2003, Mazatán metamorphic core complex (Sonora, Mexico): Structures along the detachment fault and its exhumation evolution: *Journal of South American Earth Sciences*, 16(4), 193-204.
- Velasco-Hernández, J., 1968, Reconocimiento geológico en el área de Los Alisos, Municipio de Oputo, Sonora: Consejo de Recursos Minerales No Renovables, Informe técnico.
- Velasco-Hernández, J., Del Castillo-García, L., 1969, Reconocimiento geológico, geoquímico y geofísico en el área de Los Alisos, municipio de Nacozari, Sonora: Consejo de Recursos Minerales No Renovables, Informe técnico.
- Wilkins, J., Heidrick, T.L., 1995, Post Laramide extension and rotation of porphyry copper deposits, Southwestern United States, *en* Pierce, F.W., Bolm, J.G. (eds.), *Porphyry Copper Deposits of the American Cordillera*: Arizona Geological Society Digest, 20, 109-127.
- Wilson, I.F., Rocha, V.S., 1949, Coal deposits of the Santa Clara district near Tonichi, Sonora, Mexico: *United States Geological Survey Bulletin* 962-A, 1-80.

Manuscrito recibido: Enero 28, 2011

Manuscrito corregido recibido: Enero 13, 2012

Manuscrito aceptado: Enero 20, 2012