



## Descubrimiento de vivianita en la mina La Caridad, Sonora, México

Efrén Pérez-Segura<sup>1,\*</sup>, Enrique Espinoza-Medina<sup>2</sup>, Abraham Mendoza-Córdova<sup>1</sup>, Jesús Vidal-Solano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología  
Universidad de Sonora, Hermosillo, 83000, Sonora

<sup>2</sup>Mexicana de Cananea, S.A. de C.V.

Nacozari de García, Sonora

\*efrenpese@yahoo.com

### Resumen

La mina La Caridad se ubica en Sonora y se trata de la mina más grande de México. El yacimiento es un sistema de pórfido cuprífero con una edad alrededor de 54 Ma. Sobre las coordenadas Mercator: 638232 N y 3354816 E, y entre los niveles 1305 y 1410 se han descubierto bellos ejemplares de vivianita ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) de color verde y talla centimétrica. La identificación ha sido confirmada con difracción y fluorescencia de rayos X. El mineral se ubica en el centro del depósito, en la zona de alteración potásica, pero en la transición de la zona de enriquecimiento supergénico a la de sulfuros primarios. El origen del mismo puede ser debido a aguas meteóricas, durante la formación del enriquecimiento secundario. La Caridad es la segunda localidad en México donde se reporta la presencia de vivianita.

Palabras clave: vivianita, La Caridad, fosfato, pórfido cuprífero, Sonora.

### Abstract

*The La Caridad mine is located in Sonora and it is the largest mine in Mexico. This is a porphyry type ore deposit dated at 54 Ma. Beautiful green centimetric size crystals of vivianite ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) have been discovered at Mercator coordinates 638232 N and 3354816 E, and between benches 1305 and 1410. The identification was confirmed using X ray diffraction and fluorescence. The mineral is in the core of the orebody, in the potassic hydrothermal alteration zone, but in the transition from the supergene enrichment to the primary sulfide zone. The origin of the vivianite is probably meteoric, during supergene enrichment. The La Caridad mine is the second locality in Mexico where the presence of vivianite has been reported.*

*Key words: vivianite, La Caridad, phosphate, porphyry copper, Sonora.*

### 1. Introducción

La Caridad es la mina más grande de México con una producción de 90,000 toneladas de mineral por día, con leyes de 0.40 % de Cu y 0.03 % de Mo. Se trata de un yaci-

miento de tipo pórfido cuprífero cuyas reservas, al presente año, son de 2,300 millones de toneladas de mineral con leyes de 0.38 % de Cu y 0.03 % de Mo, utilizando una ley mínima de corte (*cut-off*) de 0.30 % de Cu equivalente. Las asociaciones minerales del yacimiento permiten establecer tres zonas características:

- Una zona de oxidación con goethita, hematitas y limonitas.
- Una zona de enriquecimiento supergénico que contiene principalmente calcosita, covelita y proporciones menores de calcopirita y pirita.
- Una zona de sulfuros primarios con calcopirita, pirita y molibdenita.

El propósito fundamental del presente trabajo es el de reportar, por primera vez en Sonora y por segunda vez en México, la presencia de vivianita –  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  – en especímenes de interés para mineralogistas o coleccionistas de minerales.

## 2. Localización, identificación y origen de la vivianita

### 2.1. Localización

La mina La Caridad se localiza en el noreste del Estado de Sonora, a unos 200 km en línea recta de la ciudad de Hermosillo (Figura 1). La Caridad es un tajo abierto con un desarrollo en sentido vertical desde el banco 1800 hasta el banco 1245. Los números de bancos indican las elevaciones en metros sobre el nivel del mar. La vivianita se localiza desde el banco 1410 y hasta al menos el banco 1305, pero los mejores ejemplares colectados hasta el momento se ubican sobre el banco 1320 y sobre las coordenadas Mercator 638232 N y 3354816 E. Esto es, la parte central del yacimiento, en la zona pegmatítica del área conocida como Santa Rosa, en la transición de la zona de enriquecimiento secundario a la de sulfuros primarios, puesto que la primera se desarrolla, en esta área, entre los niveles 1605 y 1395. La vivianita rellena espacios abiertos en cavidades y fracturas, junto con óxidos de Fe y Mo. La ley promedio del mineral en esta zona es de 0.25 % de Cu y 0.05 % de Mo. Las rocas encajantes son una diorita y una granodiorita fechadas en 58.3 y 55.5 Ma, respectivamente (Valencia *et al.*, 2005). La edad de la mineralización hipogénica fechada por Re-Os en molibdenitas se sitúa en 53.6 a 53.8 Ma (Valencia *et al.*, 2005)

Los cristales de vivianita presentan coloración verde esmeralda a verde oscuro, de raya azul claro, en forma de cristales prismáticos desde tamaños milimétricos hasta 10 cm de largo (Figura 2). A la fecha se han colectado unos 10 ejemplares de colección con longitudes entre 1 y 10 cm.

### 2.2. Identificación

El mineral fue identificado en 1998 por el primer autor, sobre cristales separados analizados con un microscopio electrónico de barrido con microanalizador integrado. El hallazgo se reportó en un informe privado entregado a la compañía concesionaria del yacimiento. Dada la aparición de ejemplares de colección en los últimos años, se consideró pertinente reportar de manera oficial este mineral. Los análisis se efectuaron sobre minerales de talla centi-

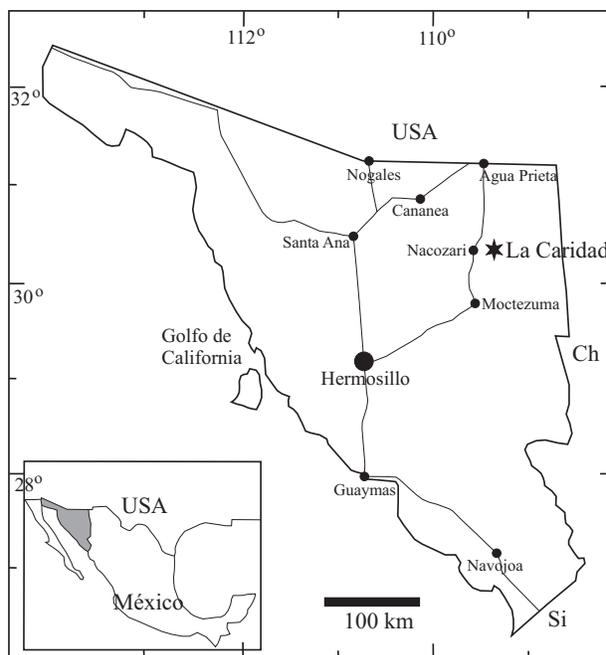


Figura 1. Plano de localización de la mina La Caridad, Sonora. Clave: USA = Estados Unidos de Norteamérica; Ch = Chihuahua; Si = Sinaloa.

métrica separados a mano, libres de impurezas y molidos en un mortero de cerámica. Las técnicas utilizadas para su identificación fueron difracción y fluorescencia de rayos X utilizando la infraestructura del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, así como ICP-AES utilizando los servicios de un laboratorio comercial certificado. Para el análisis de difracción se utilizó un difractómetro de rayos X (Bruker, D8 Advance) con radiación de  $\text{CuK}\alpha$ , en un rango de barrido de  $5^\circ$ - $60^\circ$  ( $2\theta$ ). Para los análisis por fluorescencia se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X SIEMENS SRS3400; la metodología detallada se describe en Lozano-SantaCruz *et al.* (2008). El agua se calculó por pérdida por ignición utilizando una mufla, por diferencia de peso de la muestra en dos pasos: el primero a  $110^\circ\text{C}$  y el segundo a  $1000^\circ\text{C}$ . Algunos datos preliminares de geotermometría fueron obtenidos utilizando una platina microtermométrica Linkam THMSG600 del mismo Departamento de Geología.

La Figura 3 muestra el espectro de difracción de rayos X del ejemplar analizado, comparado con el espectro de una vivianita de composición  $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Las distancias interplanares de los picos más característicos del patrón son las siguientes: 6.72, 4.05, 3.19 y 2.69. En la Tabla 1 se presenta la composición del mismo mineral, analizado por fluorescencia de rayos X y por ICP-AES, así como una comparación con datos típicos (Dana y Ford, 1932). La composición de la vivianita de La Caridad muestra valores un poco más bajos en  $\text{H}_2\text{O}$  que los de los datos clásicos. También presenta pequeñas impurezas en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{MnO}$ ; es casi seguro que Mg y Mn sustituyen al Fe en la composición del mineral.



Figuras 2. Cristales de vivianita de La Caridad.

Tabla 1. Análisis químicos de la vivianita de La Caridad y datos comparativos. Explicación: <sup>1</sup>Fluorescencia de Rayos X, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, <sup>2</sup>ICP-AES, ALS Laboratory Group Chemex, <sup>3</sup>Dana, S.E. y Ford, W.E., 1932.

	FRX <sup>1</sup>	ICP-AES <sup>2</sup>	Dana & Ford <sup>3</sup>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29.3	27.1	28.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total	47.2	46.9	
FeO total			43.0
H <sub>2</sub> O	24.2	24.7	28.7
SiO <sub>2</sub>		0.7	
MgO		0.2	
MnO		0.7	
Total	100.7	100.3	100.0

### 2.3. Origen de la vivianita

La vivianita es un mineral muy típico de ambientes sedimentarios-diagenéticos (Hearn *et al.*, 1983; Handbook of Mineralogy, 2001-2005), así como en sombreros de oxidación (*gossan*) de yacimientos relacionados con granitoides y porfidos cupríferos como en Bingham (Anderson *et al.*, 1962). Existen también referencias de vivianita relacionada a procesos hidrotermales (Baldwin *et al.*, 1978; Eastoe, 1978; Rodgers *et al.*, 1993; Neiva *et al.*, 2000; Müller *et al.*, 2001; Hyrsl y Petrov, 2006; Guastoni *et al.*,

2007), pero un origen netamente hidrotermal para la vivianita, en los diferentes casos, es discutible. Varios cristales de vivianita fueron observados al microscopio en búsqueda de inclusiones fluidas; algunas observaciones preliminares permiten reconocer numerosas inclusiones monofásicas de líquido, pero se observaron 2 inclusiones con líquido y vapor (L+V). Dichas inclusiones indican temperaturas de fusión de hielo de -0.7° y -0.2°C y de homogeneización de 142.6°C y 159.8°C en fase vapor y líquida, respectivamente. La gran preponderancia de inclusiones monofásicas de líquido sugiere que éstas fueron atrapadas a temperaturas < 100°C.

La vivianita se encuentra en cavidades y vetillas acompañando principalmente a pirita, calcopirita y molibdenita, con proporciones menores de óxidos de Fe y Mo. Se ubica en la transición de sulfuros secundarios a primarios, pero aún existen evidencias de oxidación meteórica, como lo indica la presencia de óxidos de Fe y Mo y un índice de solubilidad de cobre de 0.1 a 0.3. Dicho índice indica que un 10 a 30 % del Cu está aún presente como minerales de cobre secundarios (calcosita y covelita). Por consiguiente, la zona en que se encuentra la vivianita todavía experimentó percolación por aguas meteóricas. Por lo tanto, es muy probable que la vivianita de La Caridad se haya formado por aguas meteóricas fosfatadas descendentes hasta la zona de enriquecimiento secundario. El apatito de la zona pegmatítica, donde se encuentra el mineral, pudo aportar el fósforo necesario para la formación de la vivianita. La

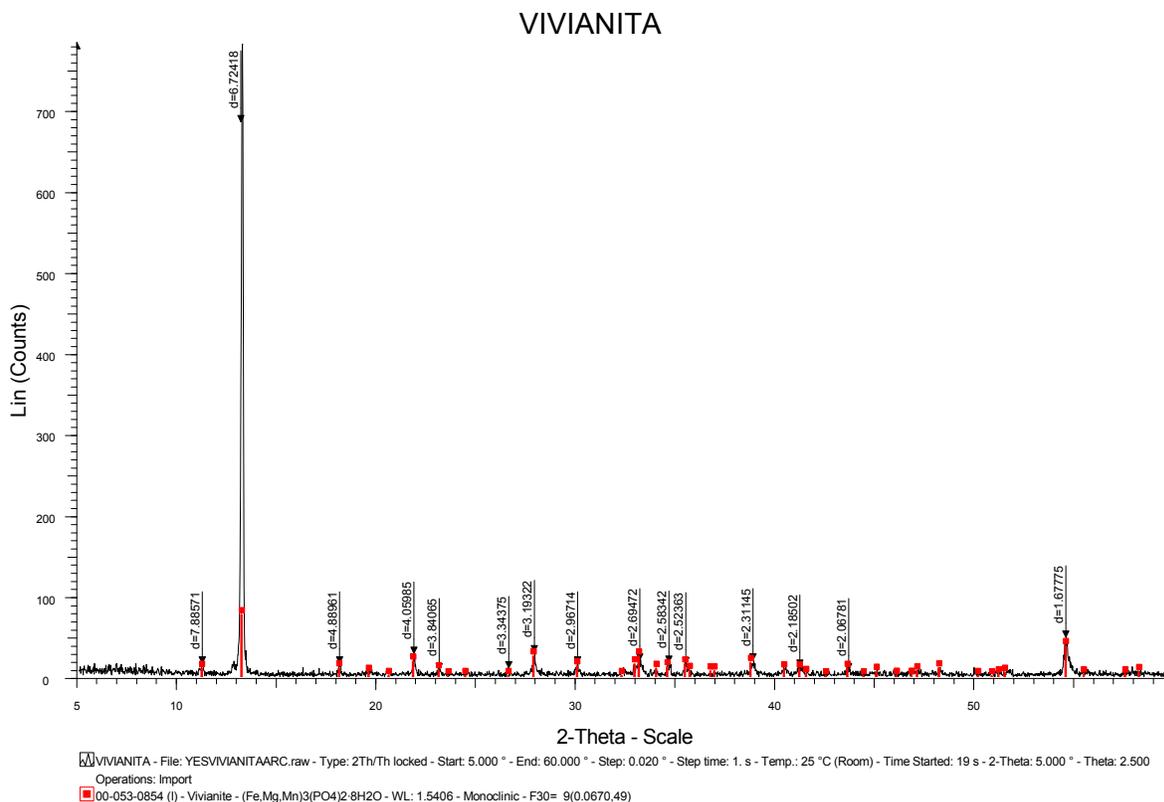


Figura 3. Espectro de difracción de rayos X para la vivianita de La Caridad comparada con espectro de referencia para una vivianita de composición  $(\text{Fe, Mg, Mn})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .

Figura 4 muestra una secuencia paragenética generalizada para el yacimiento de La Caridad, indicando la ubicación temporal de la vivianita con relación a los otros minerales del depósito.

### 3. Conclusiones

Hasta la fecha sólo se había reportado una localidad con la presencia de vivianita en México, en la mina Santa Eulalia, en Chihuahua (Handbook of Mineralogy, 2001-2005). La Caridad es la segunda localidad en el país donde se reporta la presencia de este mineral, y algunos de los especímenes colectados hasta la fecha pueden ser considerados de colección (Figura 2). La vivianita de La Caridad es de color verde oscuro a verde esmeralda, contiene pequeñas impurezas de Si, Mg y Mn, se ubica en la transición de la zona de transición de sulfuros secundarios a primarios, y se formó posiblemente a partir de aguas meteóricas durante la etapa de enriquecimiento supergénico.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a un revisor anónimo por sus acertadas sugerencias para mejorar este manuscrito. Tam-

bién se agradece a la Dra. Diana María Meza Figueroa por su apoyo en el cálculo por ignición para complementar en los análisis de FRX. Finalmente, se agradece a la Compañía Mexicana de Cobre, S.A. de C.V. por las facilidades en la colección de muestras y autorización para la presente publicación.

### Referencias bibliográficas

- Anderson, W.R., Stringham, B., Whelan, A. 1962, Secondary phosphates from Bingham, Utah: *The American Mineralogist*, 47, 1303-1309.
- Baldwin, J.T., Swain, H.D., Clark, G.H., 1978, Geology and grade distribution of the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea: *Economic Geology*, 73, 690-702.
- Dana, S.E., Ford, W.E., 1932, *A textbook of Mineralogy*: New York, John Wiley & Sons Inc., 721 p.
- Eastoe, C.J., 1978, A fluid inclusion study of the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea: *Economic Geology*, 73, 721-748.
- Guastoni, A., Nestola, F., Mazzoleni, G., Vignola, P., 2007, Mn-rich graptone, ferrisicklerite, stanèkite and Mn-rich vivianite in a granitic pegmatite at Soè Valley, central Alps, Italy: *Mineralogical Magazine*, 71, 579-585.
- Hearn, P.P., Parkhurst, D.L., Callender, E., 1983, Authigenic vivianite in Potomac River sediments, control by ferric oxy-hydroxides: *Journal of Sedimentary Research*, 53, 165-177.
- Hyrsl, J., Petrov, A., 2006, Famous mineral localities: Llallagua, Bolivia: *The Mineralogical Record*, 37 (2), 117-162.

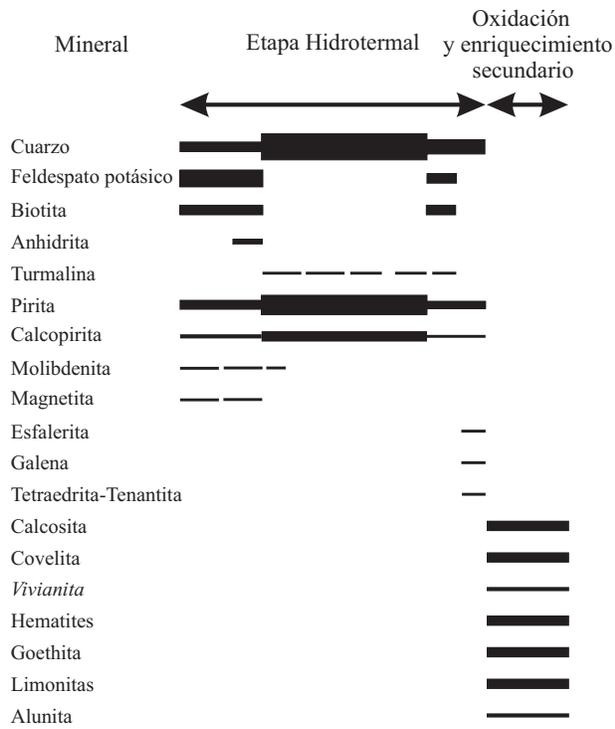


Figura 4. Secuencia paragenética generalizada para el yacimiento mostrando la ubicación temporal de la vivianita.

Handbook of Mineralogy, 2001-2005, <http://www.handbookofmineralogy.org>: Mineralogical Society of America, Mineral Data Publishing.

Lozano-SantaCruz, R., Vidal-Solano, J.R., Mendoza-Córdova, A., Peñaflor, P., Ortega-Rivera, A., 2008, Avances en el proceso de validación del método de WD-FRX para análisis de elementos mayores en rocas: Laboratorio de rayos X de la UNISON: Actas INAGEQ, 18, 6.

Müller, B., Frischknecht, R., Seward, T.M. Heinrich, C.A., Camargo-Gallegos, W., 2001, A fluid inclusion reconnaissance study of the Huanuni tin deposit (Bolivia), using LA-ICP-MS micro-analysis: Mineralium Deposita, 36, 650-658.

Neiva, A.M.R., Ramos, J.M.F., Gomes, M.E.P., Silva, M.M.V.G., Antunes, I.M.H.R., 2000, Phosphate minerals of some granitic rocks and associated quartz veins from northern and central Portugal: Journal of the Czech Geological Society, 46, 35-43.

Rodgers, K.A., Kobe, H.W., Childs, C.W., 1993, Characterization of vivianite from Catavi, Llalagua Bolivia: Mineralogy and Petrology, 47, 193-208.

Valencia, V.A., Ruiz, J., Barra, F., Gehrels, G., Ducea, M., Titley, S.R., Ochoa-Landin, 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, 99-105.

Manuscrito recibido: 20/07/2009  
 Manuscrito corregido recibido: 08/12/2009  
 Manuscrito aceptado: 13/12/2009