

## **Mineralización y distribución de especies de oro en México.**

Martínez Gutiérrez, J.M.<sup>1</sup> Galindo Murillo F.<sup>1</sup>, López Acosta I.<sup>1</sup>, Tovar Tovar R.L.<sup>1</sup>,

Euán Albornoz, L.C.<sup>2</sup>; Cruz Gaona, R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Metalurgia UASLP. Av. Sierra Leona No. 550, Lomas 2ª Sección, 78210, San Luis Potosí, S.L.P.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Inn, Perif de Mérida Lic. Manuel Berzunza 13615, Chuburná de Hidalgo, 97203, Mérida, Yucatán

### **RESUMEN**

México es reconocido mundialmente por el procesamiento de diferentes minerales, tales como: plomo, cobre, zinc, manganeso, hierro, etc., sin embargo, el interés de la industria minera recae en los metales preciosos, predominante el oro y la plata. La caracterización mineralógica es de vital importancia para determinar la mineralización del oro; sus especies, liberación y/o asociación; lo cual ayudará a determinar el proceso adecuado para su recuperación.

En el Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios de caracterización mineralógica; por lo que el presente trabajo tiene como el objetivo, analizar estadísticamente las especies minerales de oro más comunes y sus respectivas asociaciones.

En el presente trabajo, se muestra un mapeo de la mineralización del oro en la República Mexicana. Por medio del cual se determinó, que el electrum es la especie de oro que mayormente predomina, así como su asociación con otras especies de minerales sulfurosas y no sulfurosas; también se estableció la relación entre el tamaño de partícula de las especies de oro y la ley oro.

Se espera que con esta información se proporcione a la industria minera, en su etapa de exploración un amplio panorama de como podrán encontrar la mineralización del oro y a su vez una mayor motivación a la inversión minera en México.

**PALABRAS CLAVE:** *mineralogía, correlación, oro*

## ANTECEDENTES

La industria minero metalúrgica es una actividad de gran importancia para la economía en México, así como para la vida diaria de los mexicanos. Debido a la necesidad de productos metálicos o no metálicos que se extraen de la corteza terrestre. En México se cuenta con una gran variedad de industria minera que procesan minerales metálicos o no metálicos. Por lo cual es de gran interés conocer como están distribuidos los minerales de valor en el territorio nacional, (Azamar y Téllez, 2022).

Tradicionalmente, se tienen carta geológico-minera, carta geoquímica, carta magnética, entre otras; de donde se puede obtener información de litología, geología estructural, yacimientos minerales, geoquímica, magnetometría y toponimia. Sin embargo, muy pocas veces se tiene información de la mineralización de los metálicos de interés económico como lo son: oro, plata, plomo, cobre entre otros. Esta información se obtiene hasta que se llevan a cabo estudios de caracterización mineralógica de barrenos en la etapa de exploración; generando una incertidumbre con respecto a los minerales presentes y el mejor método de procesamiento para obtener una alta recuperación de ellos, y determinar la viabilidad del proyecto, (Espinoza *et al.*, 2021). Lo más cercano a determinar que minerales se tienen en la República Mexicana es un mapa metalogénico que nos indica el potencial minero de México figura 1.

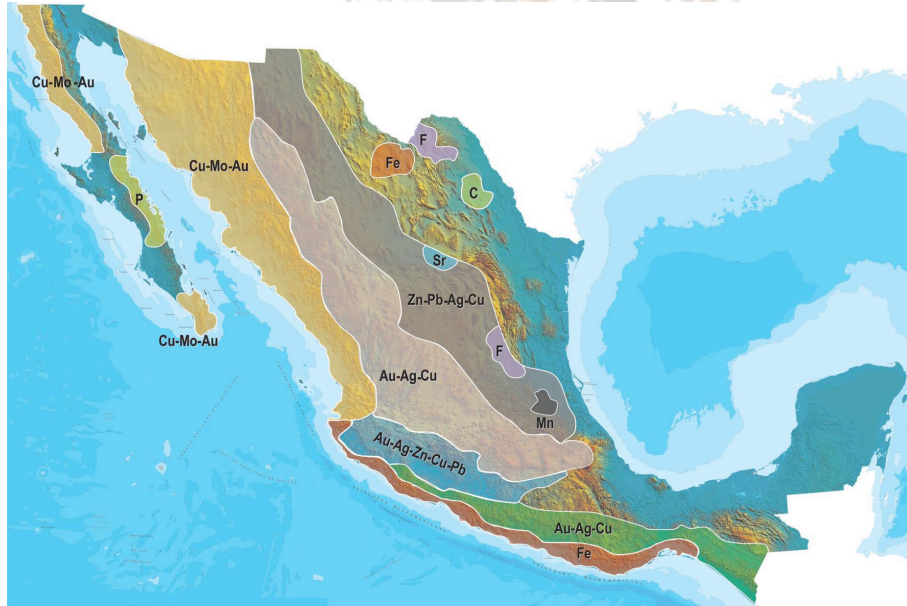


Figura 1. Mapa metalogénico de México.

En la mayoría de los proyectos minero-metalúrgicos, el interés económico está basado en los metales preciosos, siendo el oro el de mayor interés en México, por lo que es importante conocer como mineraliza. El oro generalmente se encuentra como: oro nativo, electrum, telururos, seleniuros, sulfuros de oro y como oro invisible; en la tabla 1, se enlistan los minerales auríferos reportados por Petruk, W.(2000). Las especies de oro comúnmente se encuentran asociadas a minerales de interés metalúrgico o a minerales de ganga, los cuales pueden generar problemas para su recuperación.

**Tabla 1.** Minerales auríferos

<b>Gold alloy</b>		<b>Gold tellurides</b>	
Native gold	Au	Sylvanite	(Au,Ag) <sub>2</sub> Te <sub>4</sub>
Electrum	(Au,Ag)	Kostovite	CuAuTe <sub>3</sub>
Gold alloy	(Au,Ag,Hg)	Calaverite	AuTe <sub>2</sub>
γ - gold amalgam	(Au,Ag)Hg	Montbrayite	(Au,Sb) <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>
Weishanite	(Au,Ag) <sub>3</sub> Hg <sub>2</sub>	Krennerite	(Au,Ag)Te <sub>2</sub>
Auricupride	Cu <sub>3</sub> Au	Petzite	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>
Teta - auricupride	CuAu	Bilibinskite	Au <sub>3</sub> Cu <sub>2</sub> PbTe <sub>2</sub>
Aurostibite	AuSb <sub>2</sub>	Muthmannite	(Ag,Au)Te
Anyuinite	Au(Pb,Sb) <sub>2</sub>	Bezsmeritnovite	Au <sub>4</sub> Cu(Te,Pb)
Maldonite	Au <sub>2</sub> Bi	Bogdanovite	(Au,Te,Pb) <sub>3</sub> (Cu,Fe)
Zvyagintsevite	(Pb,Pt,Au) <sub>3</sub> (Pb,Sn)	Buckhornite	AuPb <sub>2</sub> BiTe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
<b>Gold sulfides</b>		<b>Gold selenides</b>	
Nagyagite	Pb <sub>5</sub> Au(Sb,Bi)Te <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	Fischesserite	Ag <sub>3</sub> AuSe <sub>2</sub>
Uytenbogaardtite	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub>	Petrovskaitite	AuAg(S,Se)
Criddleite	TlAg <sub>2</sub> Au <sub>3</sub> Sb <sub>10</sub> S <sub>10</sub>	Penzhinite	(Ag,Cu) <sub>4</sub> Au(S,Se) <sub>4</sub>
Buckhornite	AuPb <sub>2</sub> BiTe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		
<b>Secondary gold</b>		<b>Invisible gold</b>	
Secondary gold	Au	Arsenopyrite	0.2 - 15200 ppm
Aurantimonate	AuSbO <sub>3</sub>	Pyrite	0.2 - 132 ppm
		Loellingite	0.2 - 275 ppm
		Tetrahedrite	0.2 - 72 ppm
		Chalcopyrite	0.2 - 7.7 ppm

Las principales asociaciones del oro con minerales sulfurosos son: pirita, arsenopirita, galena, calcopirita, esfalerita, pirrotina, tetraedrita y tenientita, mientras que en las asociaciones con minerales no sulfurosos se encuentran: cuarzo, feldespato potasio (K), feldespato de sodio (Na), calcita, dolomita, entre otros, (Petruk, W.2000, pp4).

El tipo de asociación o textura comúnmente encontrado para el oro son: a) en fractura o microfracturas en la roca, b) entre granos de mineral o entre los granos de varios minerales, c) ocluido en un mineral (encapsulado), d) submicroscópico (nanométrico) ocluido en mineral y e) en solución sólida, figura 2.

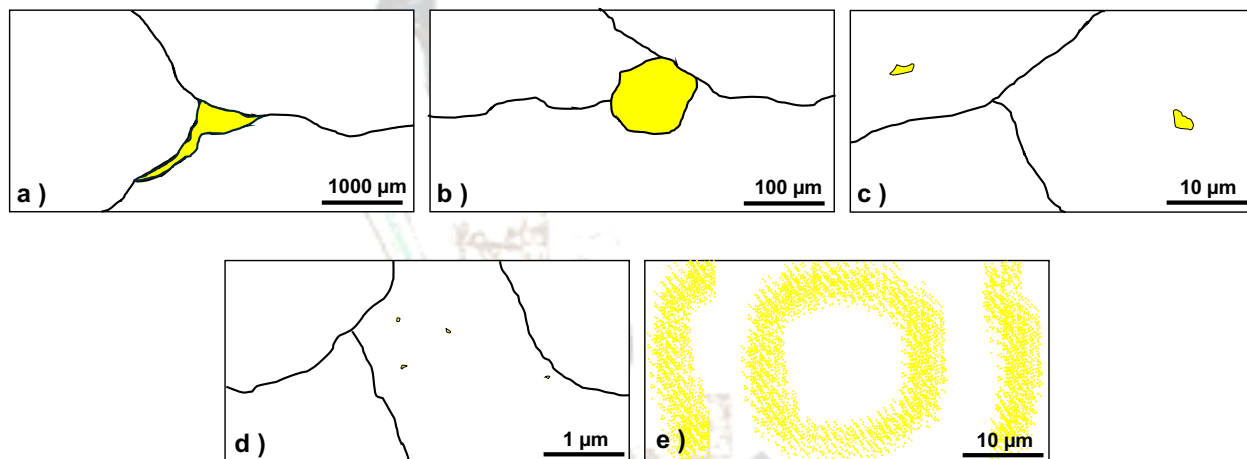


Figura 2. Textura de las especies de oro.

El tener una idea previa de la mineralización y asociación de las especies de oro nos ayudará a tener una idea más clara durante la exploración y así poder visualizar la viabilidad del proyecto motivado el desarrollo de la minería en México. Para lo cual los estudios de caracterización mineralógica son de gran importancia ya que brindaría información detallada debido a la integración de varias técnicas como microscopía óptica, difracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido, espectroscopia, entre otras (Melgarejo *et al.*, 2010).

El objetivo de este trabajo, es ofrecer una base y proporcionar una metodología para poder mapear las especies de oro, asociaciones y tipo de asociación en las República Mexicana (RM).

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El Instituto de Metalurgia, cuentan con reportes de estudios de caracterización mineralógicas elaborados para la industria minera desde el año 2012 a la fecha; siendo un poco más de 2000 reportes; los cuales fueron generados por la Maestra María del Carmen Ojeda Escamilla y su grupo de trabajo.

Para este trabajo se consideraron los reportes de los años 2012 y 2013; los cuales, después de 10 años, ya ha sido liberados del embargo por acuerdo de confidencialidad y su información puede ser utilizada en forma libre. Cada uno de los reportes antes mencionados, están elaborados bajo el siguiente esquema.



### **Preparación de muestra para caracterización mineralógica**

Una vez recibida la muestra, esta se identifica con una clave interna y se clasifica en: a) **cabeza** y b) **proceso**, las muestras de cabeza son: barrenos, muestra de mano o cabeza a proceso; mientras que las muestras de proceso son: productos o etapas de algún proceso metalúrgico (alimentación, concentrado, medios, remoliendas, colas, etc.).

Las muestras de **cabeza** son reducidas a tamaños menores a 10 mallas (2000  $\mu\text{m}$ ), utilizando quebradoras de quijada y de cono. Luego, se homogeniza por la técnica del tapeteo y se cuartea hasta obtener dos muestras de aproximadamente de 50 g. Una de las muestras es para llevarse a análisis químico y difracción de rayos x; y la segunda muestra es para estudios de caracterización mineralógica.

Las muestras de **proceso** son homogenizadas por la técnica de tapeteo, se cuartea y hasta obtener dos muestras de aproximadamente de 50 g, separándose en dos muestras para los mismos análisis mencionados anteriormente.

### **Análisis químico**

Todas las muestras se envían a análisis químico. El ensaye de oro se determina por extracción con solvente y empleando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. El análisis químico de oro (Au) por este método puede aplicarse rutinariamente a muestras minerales. Se pesa la muestra y se digiere en placa con mezcla de cuatro ácidos, posteriormente se recupera con ácido clorhídrico al 50% y se filtra. Se hace una extracción líquido-líquido con metil isobutil-cetona. Posteriormente se cuantifica en la fase orgánica con estándares puros certificados Perkin Elmer.

### **Montaje de probeta**

El mineral es encapsulado en resina epóxica (Buehler 20-8140-032) que penetra entre las partículas de mineral, después de un tiempo la resina se solidifica formando una probeta. Posteriormente, la probeta es desbastada con papel abrasivo (220, 320, 400, 600 y 1200) para exponer el mineral; enseguida es pulida con pasta de diamante para generar una superficie con acabado espejo,

### **Microscopía electrónica de barrido**

Para que las muestras puedan ser analizadas por microscopía electrónica de barrido es necesario que la muestra sea conductora, es por esta razón se realiza una preparación adicional, que consiste en depositar una película de carbono en la cara recién pulida de la probeta. Ya preparadas las muestras, fueron analizadas en un equipo marca Philips modelo XL-30 y marca JEOL modelo JSM-6610LV equipado con detector de electrones retrodispersados, detector de electrones secundarios y detector de dispersión de energía de rayos X, marca Oxford Instruments modelo X-MAX 20  $\text{mm}^2$ . Las imágenes se obtuvieron por medio de electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersos (BES) y el análisis elemental semicuantitativo (porcentaje en peso) por dispersión de energía de rayos X (EDS).

## Análisis estadístico

Se recopilaron y organizaron los datos relevantes sobre reportes que incluyen muestras con oro, incluyendo información sobre: tipo de muestra, la ley, especies de oro, el tamaño de las partículas, minerales asociados, tipo de asociación y estado de la república a la que pertenece la muestra. Se realizó un análisis estadístico de los datos por medio del software Excel. Se utilizaron medidas descriptivas como la frecuencia de aparición de las diferentes especies y la correlación entre la ley y el tamaño de la partícula. Una vez obtenidos los resultados del análisis estadístico, se procedió a mapear los asentamientos de oro en el territorio mexicano. Esto implica la representación gráfica de la distribución espacial de las especies minerales identificadas y sus asociaciones correspondientes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se cuentan con 374 reportes analizados y liberados. Las muestras se clasificaron en función de su contenido de oro, generando cuatro rangos de concentración: a) menor a 1 g/t, b) mayor e igual a 1 g/t y menor a 10g/t, c) mayor e igual a 10g/t y menor a 100 g/t y d) mayor a 100 g/t; también se determinó la cantidad de muestras en las cuales se encontró como mínimo una partícula de oro visible por microscopía electrónica de barrido. En la figura 3, se observa la distribución de muestra que contienen oro en función del rango de concentración, así como la cantidad de muestras en las cuales se observó el oro. La mayoría de las muestras contenían menos de 1 g/t de Au, de las cuales únicamente en tres de ellas se observó el oro; lo que demuestra la dificultad para determinar su tamaño y tipo de asociación; conforme el contenido de oro incrementa, se facilita el observar partículas de oro. De las 374 muestras, en 59 se pudo observar alguna especie de oro, 40 muestras son de cabeza y 19 son productos de proceso.

Las especies de oro encontradas en las muestras fueron: electrum (Au,Ag), oro nativo ( $Au^0$ ), silvanita ( $(Au,Ag)_2Te_4$ ), calaverita ( $AuTe_2$ ), oro en cerargirita (AgCl,Au) y oro en AgCuSe. En la figura 4, se muestra la distribución de las especies encontradas, siendo el electrum la especie de oro que con más frecuencia aparece (con un 66%), seguida del oro nativo (con un 24%), en menor cantidad silvanita y calaverita (con un 5% y 2%); el restante (3%) se encontraron dos especies con contenidos de oro: una en cerargirita y otra en plata-cobre.

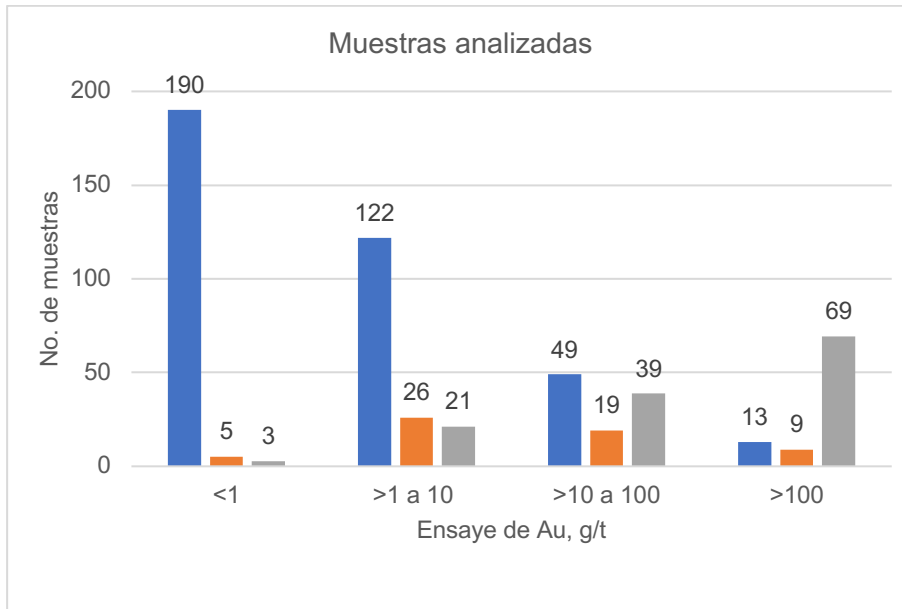


Figura 3. Distribución de muestras en función del ensayo de oro (■), muestras con oro encontrado (■) y porcentaje (■).

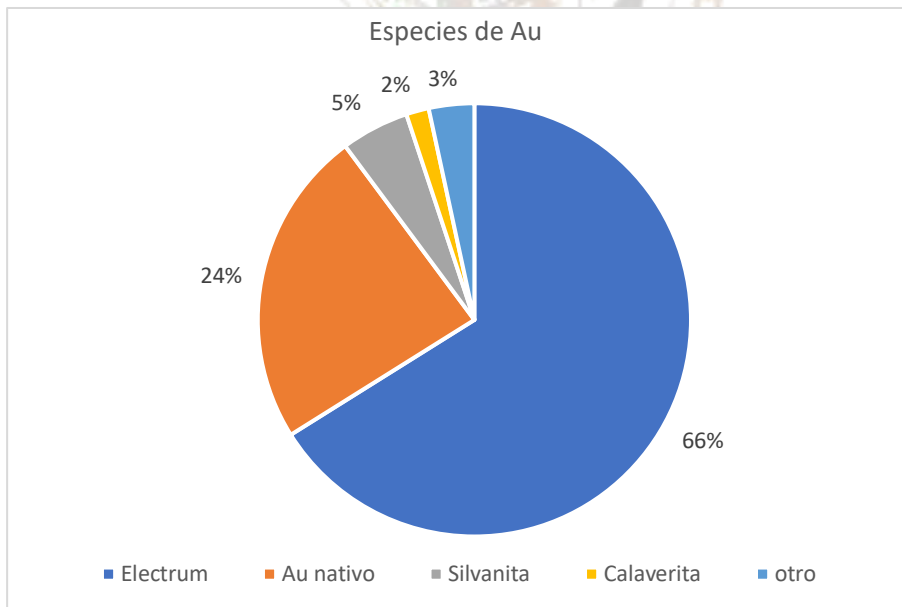


Figura 4. Distribución de oro encontrada en las 59 muestras.

Una vez determinadas las especies de oro, así como la frecuencia con las que se encontraron, se mapeo las especies de oro por estado en la República Mexicana, en la figura 5, se representa este mapeo de oro como electrum, se puede observar que Durango, San Luis Potosí y Zacatecas son los estados en los que con mayor frecuencia se encontró. Mientras que en la figura 6, se mapeo el oro como oro nativo; siendo Querétaro y Zacatecas los estados con mayor presencia de esta especie. La silvanita y calaverita se encontraron en el estado de Zacatecas, mientras que oro en cerargirita en el Estado de México y oro en plata-cobre en Sonora.

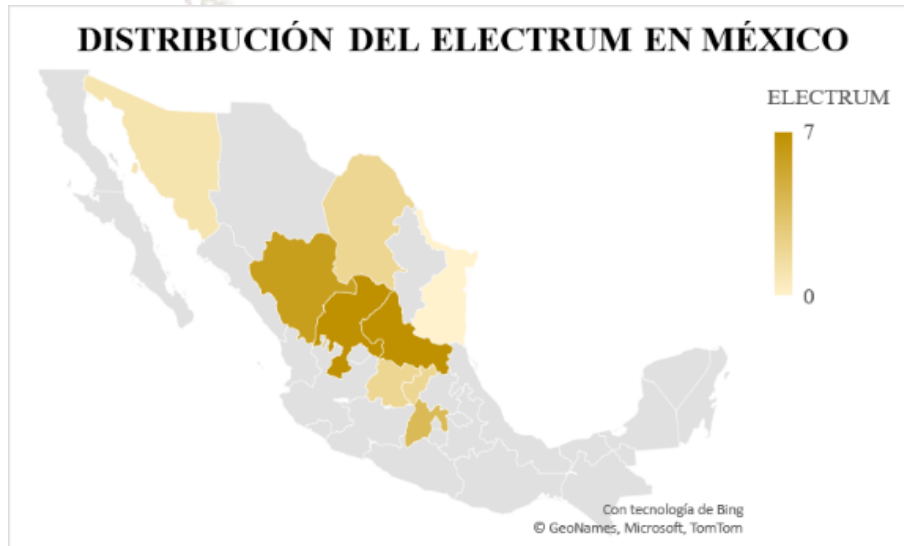


Figura 5. Distribución del electrum en la república mexicana.



Figura 6. Distribución del oro nativo en la república mexicana.

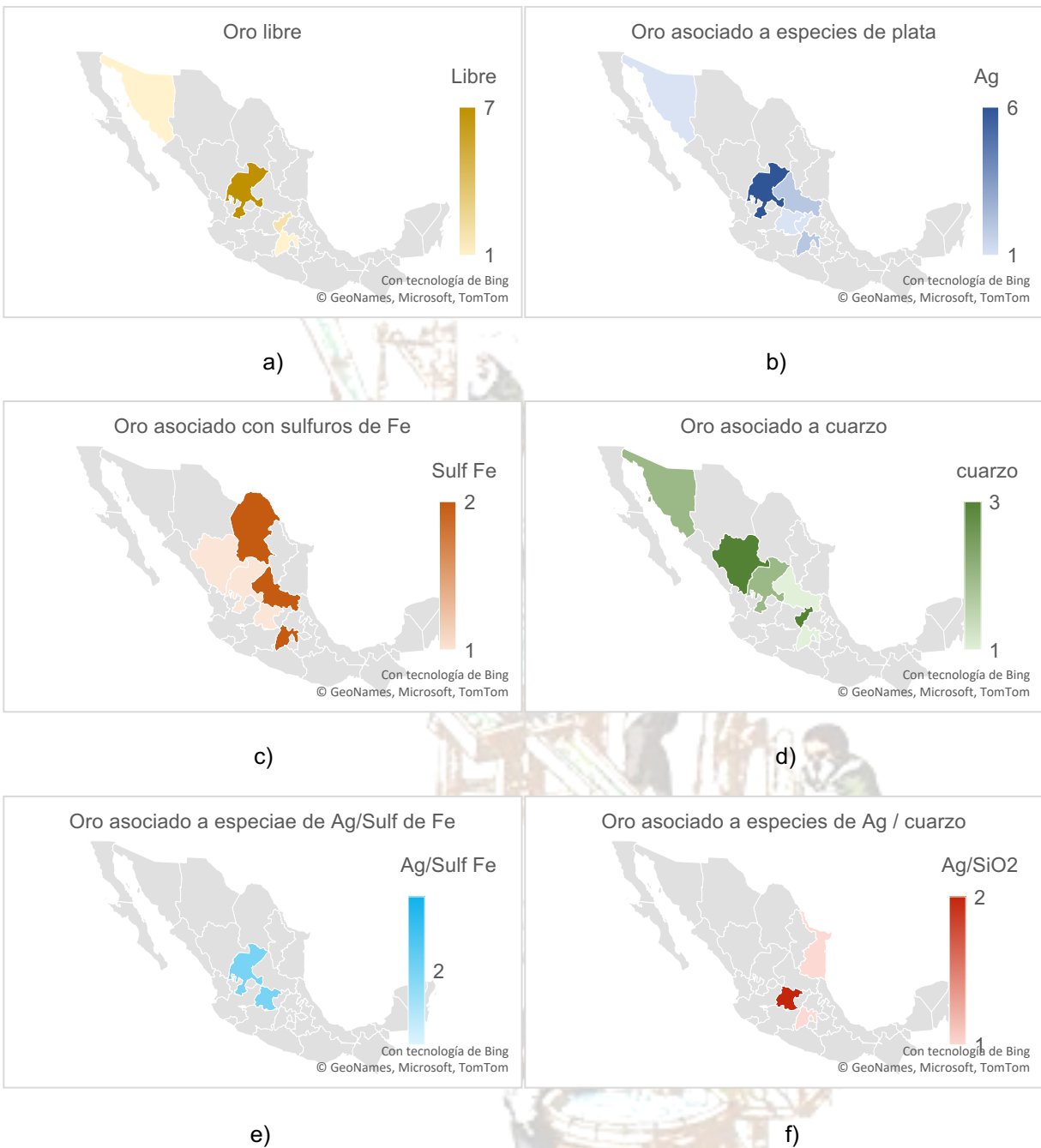


De las especies de oro encontradas en las 59 muestras, 14.47% son libres y el resto en asociación binaria o ternarias con diversos minerales. En la tabla 2, se encuentra la distribución de liberación y asociación del oro. La asociación más común es con cuarzo (18.42%), seguida de especies de plata (17.11%) y especies de sulfuros de hierro (11.84%); otras asociaciones binarias menos frecuentes son con; galena, tetraedrita-tenantita, magnetita, calcita y silicatos (feldespatos). También se encontraron asociaciones ternarias con especies de plata/pirita, especies de plata/cuarzo, pirita/cuarzo, entre otros.

**Tabla 2.** Distribución porcentual de liberación y asociaciones binaria y ternaria de oro

Liberación		Distr.	c/Óxidos		
Libres		14.47%	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.26%
<b>Asociaciones binarias</b>			Calcita	CaCO <sub>3</sub>	1.32%
<b>c/Especies de Ag</b>			Silicatos Ca FE		7.89%
Aguilarita	Ag <sub>2</sub> (S,Se)	17.11%	Feldespatos de K		
Freibergita	AgCu <sub>6</sub> S <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		Feldespatos de Na		
Hesita	Ag <sub>2</sub> Te		Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	18.42%
Estromellerita	(Ag,Cu) <sub>2</sub> S		<b>Asociaciones ternarias</b>		
Pirargirita	3Ag <sub>2</sub> SSb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		Argentita / Galena	Ag <sub>2</sub> S / PbS	1.32%
<b>c/Sulfuros Pb</b>			Aguilarita / Pirita	Ag <sub>2</sub> (S,Se) / FeS <sub>2</sub>	5.26%
Galena	PbS	1.32%	Pirargirita / Pirita	3Ag <sub>2</sub> SSb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> / FeS <sub>2</sub>	
<b>c/Sulfuros Cu</b>			Aguilarita / Cuarzo	Ag <sub>2</sub> (S,Se) / SiO <sub>2</sub>	5.26%
Tetraedrita - Tenantita	Cu <sub>6</sub> S <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> - Cu <sub>6</sub> S <sub>3</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	3.95%	Argentita / Cuarzo	Ag <sub>2</sub> S / SiO <sub>2</sub>	
<b>c/Sulfuros Fe</b>			Cerargirita / Cuarzo	AgCl / SiO <sub>2</sub>	
Pirita	FeS <sub>2</sub>	11.84%	Calcopirita / Bismutinita	CUFeS <sub>2</sub> / BiS	2.63%
Marcasita	FeS <sub>2</sub>		Pirita / Cuarzo	FeS <sub>2</sub> / SiO <sub>2</sub>	3.95%

Se mapearon los datos de la liberación, asociación binaria y ternaria con mayor frecuencia de las especies de oro. En la figura 7a, se observa que el estado de Zacatecas tiene una mayor presencia de oro libre que el resto de la república. Con relación a las asociaciones binarias, la más frecuentes son: a) con especies de plata en el estado de Zacatecas seguido de San Luis Potosí y el Estado de México, figura 7b, b) con sulfuros de Fe en los estados de Coahuila, San Luis Potosí y el Estado de México, figura 7c, y c) con cuarzo en los estados de Durango y Querétaro, figura 7d. Las asociaciones ternarias más frecuentes fueron: especies de plata/sulfuros de hierro en Guanajuato y Zacatecas, figura 7e; mientras que la asociación con especies de plata/ cuarzo fue en Guanajuato, 7f. En la tabla 3, se reporta la liberación y asociación binaria y/o ternaria del oro para cada uno de los estados donde se encontró alguna especie de oro.

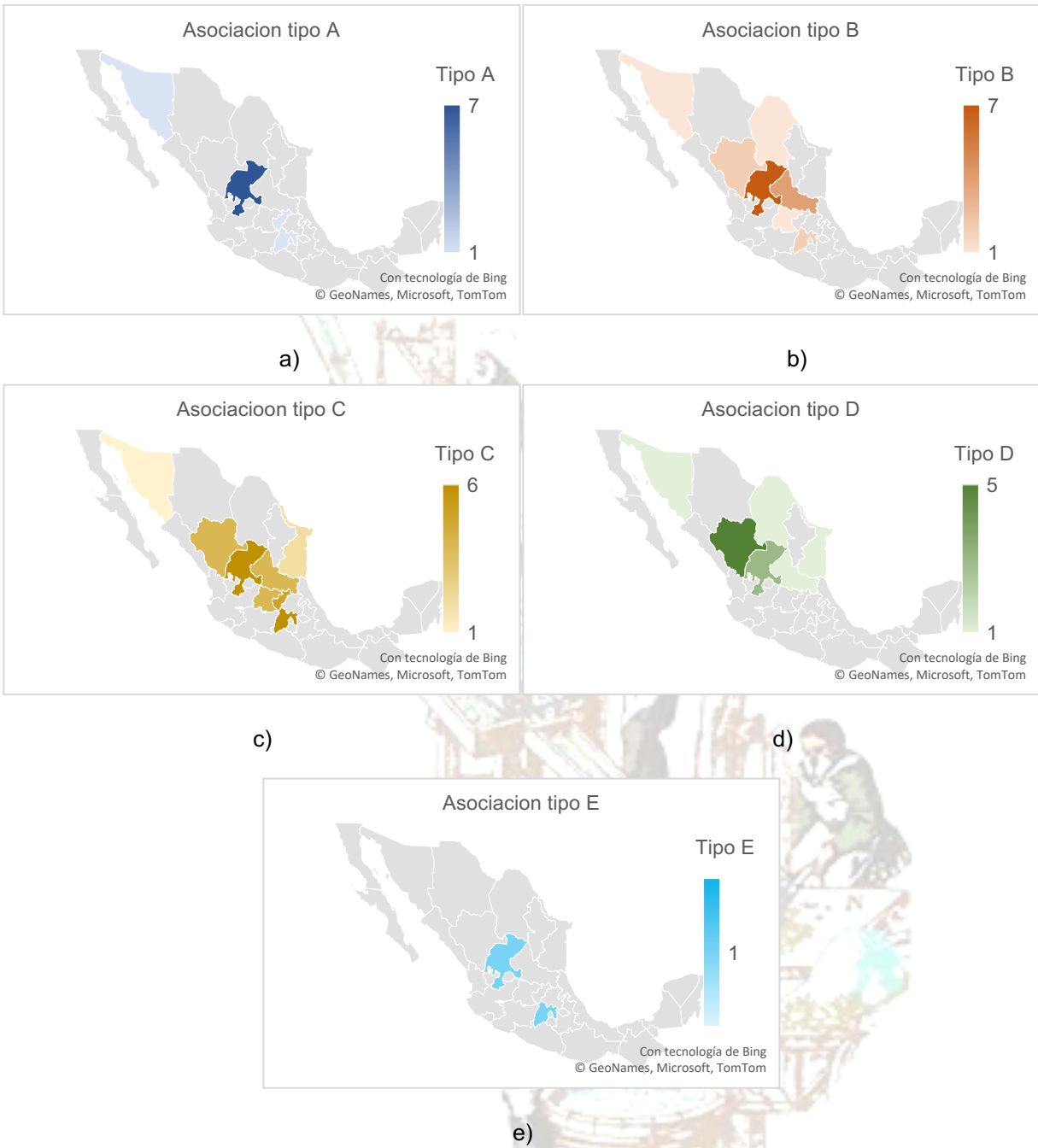


**Figura 7,** Mapeo de oro libre y asociados en la república mexicana, a) oro libre, b) oro asociado a especies de plata, c) oro asociado a sulfuros de hierro, d) oro asociado a cuarzo, e) oro asociado a especies de plata/sulfuros de hierro y f) oro asociado a especies de plata/cuarzo

**Tabla 3.** Especies con las cuales se suelen encontrar el oro por estado.

COAHUILA		SAN LUIS POTOSÍ	
Pirita	FeS <sub>2</sub>	Freibergita	SiO <sub>2</sub>
DURANGO		Estromellerita	(Ag,Cu) <sub>2</sub> S
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Pirita	FeS <sub>2</sub>
Feldespatos de K		Marcasita	FeS <sub>2</sub>
Pirita	FeS <sub>2</sub>	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Pirita / Cuarzo	FeS <sub>2</sub> / SiO <sub>2</sub>	Argentita / Galena	Ag <sub>2</sub> S / PbS
ESTADO DE MÉXICO		SONORA	
Libre		Libre	
Freibergita	AgCu <sub>6</sub> S <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Estromellerita	(Ag,Cu) <sub>2</sub> S
Tetraedita - Tenantita	Cu <sub>6</sub> S <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> - Cu <sub>6</sub> S <sub>3</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Pirita	FeS <sub>2</sub>	TAMAULIPAS	
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Feldespatos de K	
Cerargirita / Cuarzo	AgCl / SiO <sub>2</sub>	Argentita / Cuarzo	Ag <sub>2</sub> S / SiO <sub>2</sub>
GUANAJUATO		ZACATECAS	
Aguilarita	Ag <sub>2</sub> (S,Se)	Libre	
Pirargirita	3Ag <sub>2</sub> SSb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Aguilarita	Ag <sub>2</sub> (S,Se)
Pirita	FeS <sub>2</sub>	Hesita	Ag <sub>2</sub> Te
Aguilarita / Pirita	Ag <sub>2</sub> (S,Se) / FeS <sub>2</sub>	Calcita	CaCO <sub>3</sub>
Pirargirita / Pirita	3Ag <sub>2</sub> SSb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> / FeS <sub>2</sub>	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Aguilarita / Cuarzo	Ag <sub>2</sub> (S,Se) / SiO <sub>2</sub>	Aguilarita / Pirita	Ag <sub>2</sub> (S,Se) / FeS <sub>2</sub>
QUERÉTARO		Calcopirita / Bismutinita	CUFeS <sub>2</sub> / BiS
Libre			
Aguilarita / Cuarzo	Ag <sub>2</sub> (S,Se) / SiO <sub>2</sub>		

El tipo de asociación frecuentemente encontrado es del tipo de oclusiones, seguida de asociación simple, micro oclusión, microfracturas (libres) y en menor cantidad las de solución sólida. En la figura 8, se muestran los mapeos de la liberación y de las distintas asociaciones en la República Mexicana. En la figura 8a se observa el mapeo de las partículas de oro libres que asumimos que se encontraban en microfracturas; en la figura 8b, las asociaciones simples, en la figura 8c, las asociaciones tipo oclusiones, mientras que la asociación tipo micro oclusiones se muestran en la figura 8d y finalmente oro en solución sólida figura 8e.



**Figura 8.** Mapeo de los tipos de asociaciones del oro: a) en fractura o microfracturas en la roca, b) entre granos de mineral o entre los granos de varios minerales, c) ocluido en un mineral (encapsulado), d) submicroscópico (nanométrico) ocluido en mineral y e) en solución sólida.

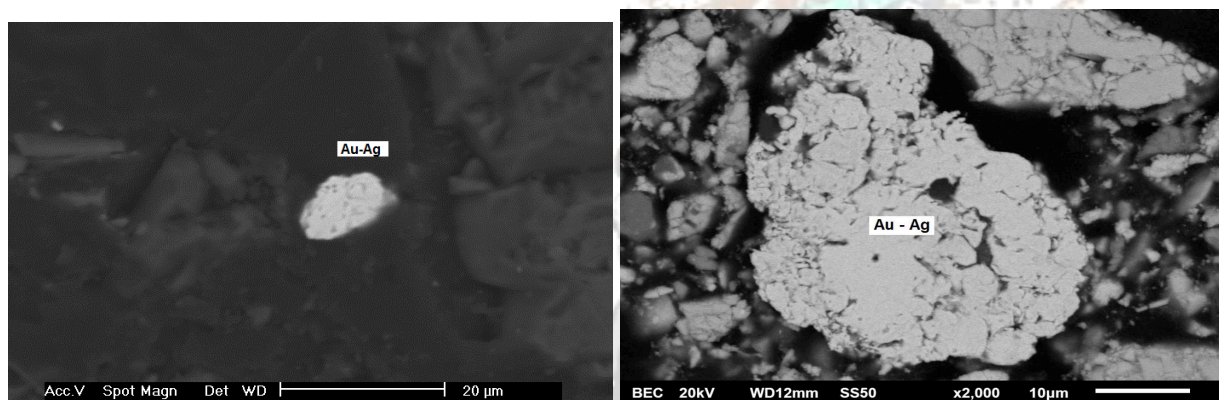
En la figura 9 se presentan las imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB), correspondiente a las partículas de oro como electrum, en tamaños de 17 y 30 micras, que se encuentran libres, tanto de muestras de cabeza, como de concentrado y en la figura 10 se muestra una partícula de oro nativo de 5 micras libres, correspondiente a muestra de cabeza.

Como se mencionó anteriormente, las especies de oro se encuentran ocluidas a especies de plata. En la figura 11, se observan las micro oclusiones de electrum en tamaños menores de 1 micra en aguilarita, así como oclusiones de 9 micras en aguilarita con pirita. Otra de las asociaciones más comunes es con sulfuros de hierro; en la figura 12, se muestra electrum en tamaños menores de 1 micra en pirita y marcasita.

En la figura 13, se pueden observar las asociaciones tipo oclusión de electrum (2 micras) y oro nativo (3 micras) en cuarzo. También se encontraron oro nativo y electrum, microocluido en feldespatos y cuarzo en muestras de cabeza, figura 14.

Se detectó la presencia de contenidos de oro en especies de AgCuSe y cerarguirita, las cuales se consideraron como solución sólida, en la figura 15a, el oro en AgCuSe se encuentra asociados a especie de plata mientras que en la figura 15b, se observa el oro en cerarguirita esta microocluido en cuarzo.

Algunas de las asociaciones ternarias que se encontraron es de electrum en pirita/cuarzo, tal y como se aprecia en la figura 16.



**Figura 9.** Electrum libre: a) 17 micras encontrado en muestra de cabeza del estado de México y b) 30 micras encontrada en concentrado del estado de Zacatecas



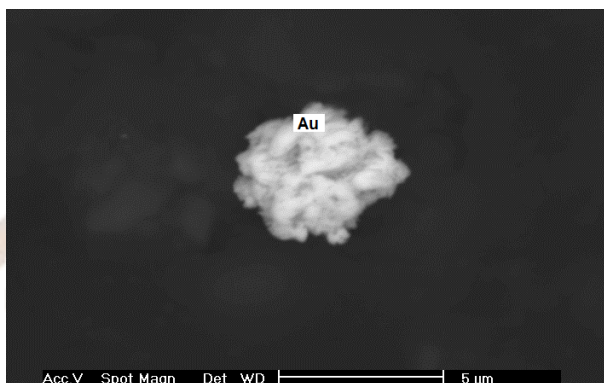


Figura 10. Oro nativo libre de 5 micras, encontrada en muestra de cabeza del Sonora.

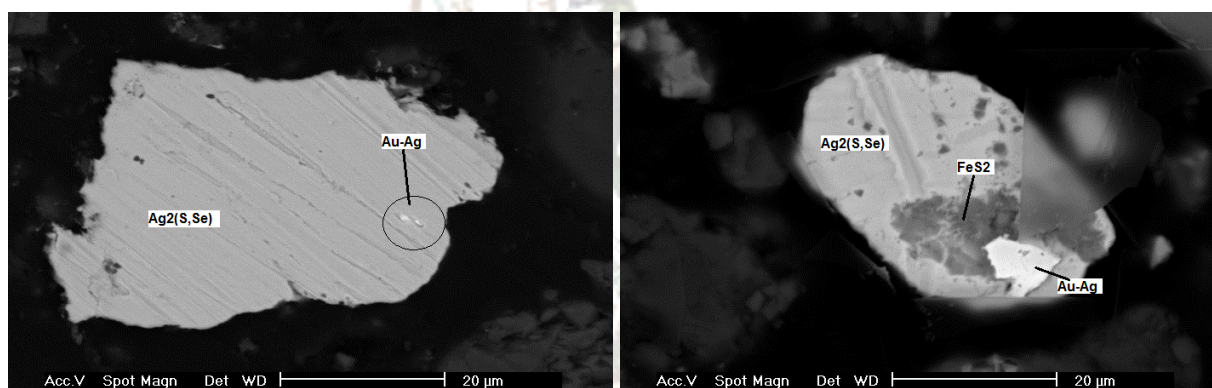


Figura 11. Electrum a) menores de 1 micra ocluida en agularita de 45 micras, encontrada en muestra de cabeza del estado de Querétaro b) de 9 micras asociados a agularita/pirita, encontrada en muestra de concentrado del estado de Zacatecas

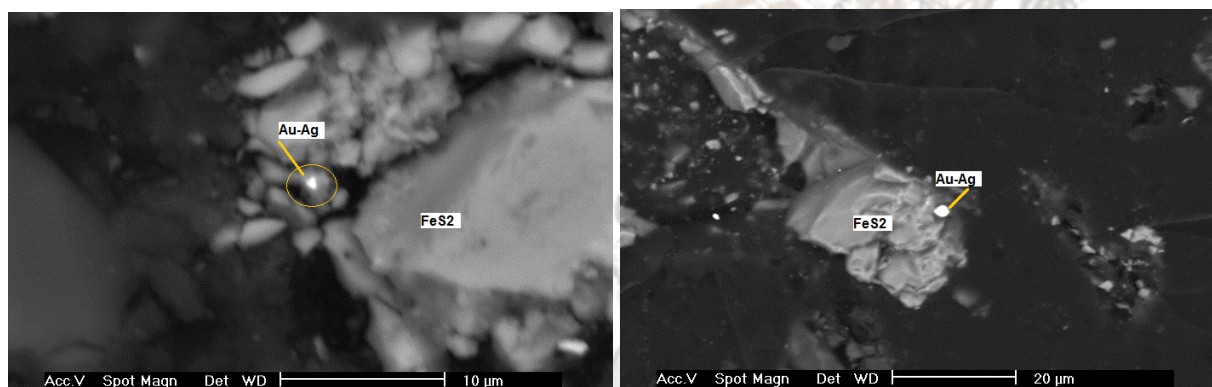
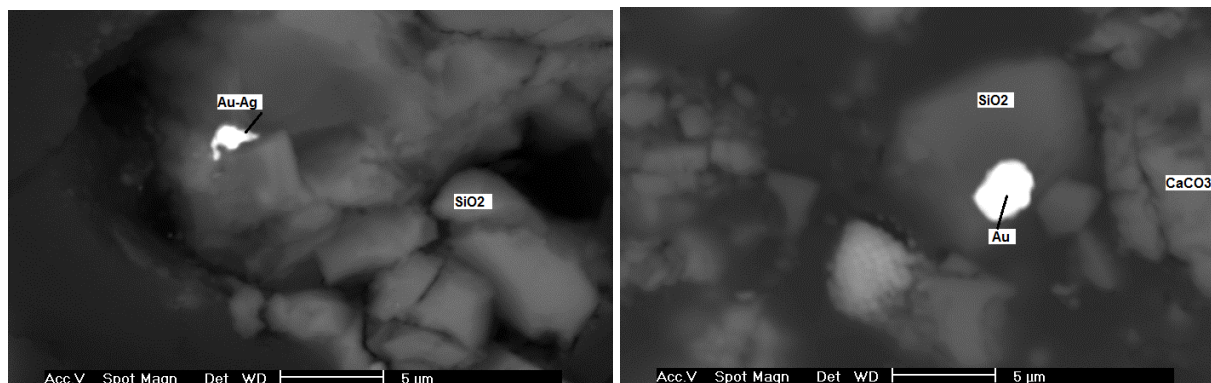
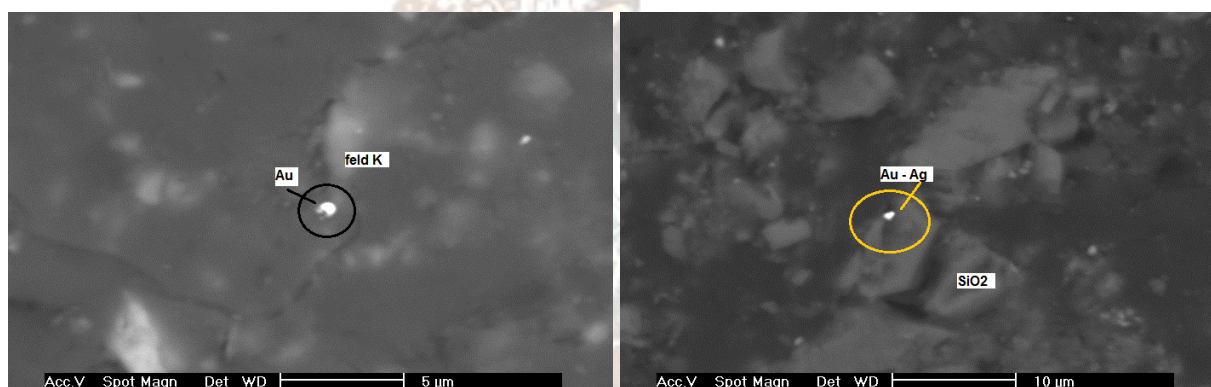


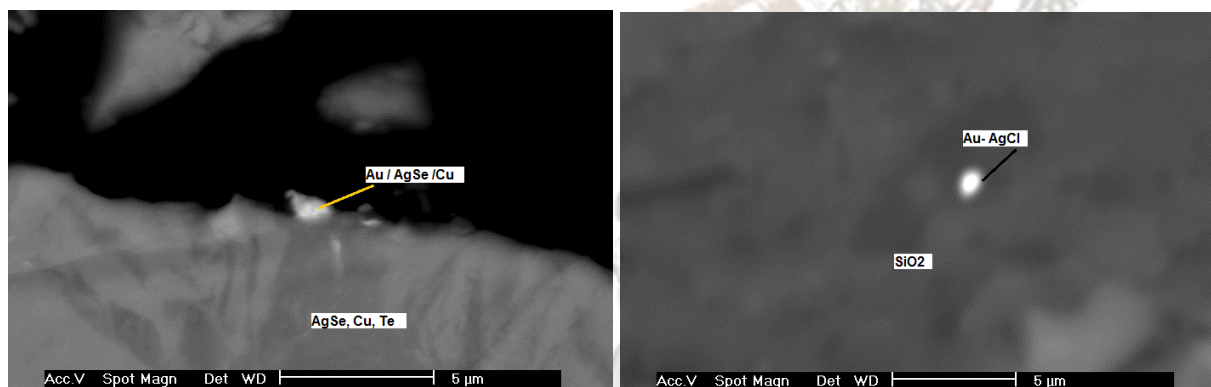
Figura 12. Electrum: a) menor a 1 micra ocluido en pirita encontrada en muestra de cabeza del estado de Coahuila y b) 1 micra ocluida en marcasita, encontrada en muestra de cabeza del estado de San Luis Potosí.



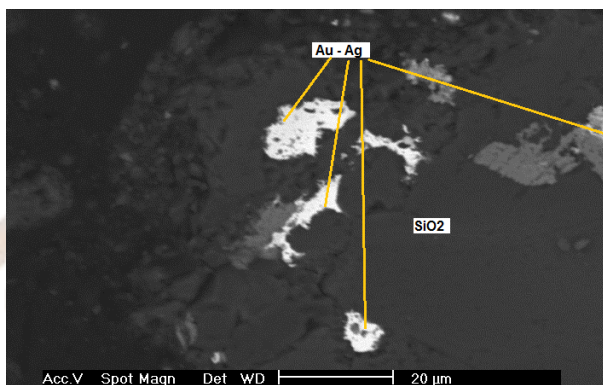
**Figura 13.** a) Electrum de 2 micras ocluida en cuarzo y b) oro nativo de 3 micras ocluido en cuarzo encontrada en muestra de cabeza del estado de Querétaro.



**Figura 14.** a) Oro nativo menor de 1 micra ocluido en feldespato de K, encontrada en muestra de cabeza del estado de Tamaulipas y b) Electrum menor de 1 micra ocluida en cuarzo, encontrada en muestra de cabeza de Durango



**Figura 15.** a) Au en Ag-Cu-Se de 1 micra en periferia de partícula de cuyo análisis puntual reporta una mezcla de Ag/Se – Cu y b) Au en cerargirita de 0.5 micras, el análisis puntual revela contenidos de Cu-Zn, ocluido en cuarzo.



**Figura 16.** Electrum de tamaños de 2 a 20 micras ocluido en cuarzo con piritas, encontrado en muestra de cabeza de durango

La distribución de tamaño de las partículas de oro, ya sean libres o asociadas para muestras de cabeza y muestras de proceso, se reportan en la tabla 4. Para ambos tipos de muestras la mayoría de las partículas de oro se encuentran entre 1 a 10 micras

**Tabla 4.** Distribución de partículas de oro por rango de tamaños, para muestras de cabeza y muestras de proceso.

Tamaño, µm	Cabeza		Proceso	
	No. de muestras	Distribución, %	No. de muestras	Distribución, %
+ 100	0	0.00	0	0.00
-100 +10	8	20.00	7	36.84
-10 +1	30	75.00	12	63.16
-1	2	5.00	0	0.00
	40	100.00	19	100.00

En la Figura 17, se muestra la relación de tamaño de partícula de oro con respecto a la ley de oro de las muestras donde se encontró alguna partícula de oro, no se muestra una tenencia en la relación tamaño vs ley; sin embargo, si se observa que generalmente los tamaños de partículas son pequeños.



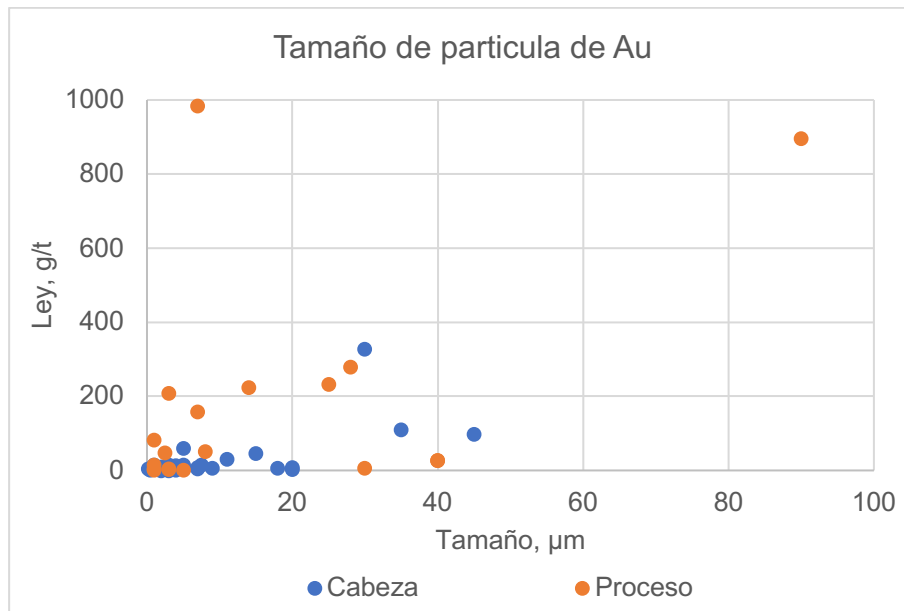


Figura 17. Gráfica de dispersión del tamaño de partícula de oro y ley de oro en la muestra analizada

El rango de tamaño de las partículas de oro es muy variado, en la tabla 5, se reportan estos rangos por estado, en el estado de Zacatecas se encuentra el rango más amplio, esto es debido a que en una de las muestras se encontró una partícula de oro de 90 µm; mientras que en el estado de México y Sonora se encontraron los tamaños más pequeños (menor a 1 µm).

Tabla 5. Rango de tamaños de partículas de oro por estado.

Estado	Tamaño, µm	
	mínimo	máximo
COAHUILA	1.00	7.00
DURANGO	1.00	45.00
ESTADO DE MÉXICO	0.50	30.00
GUANAJUATO	2.00	7.00
QUERÉTARO	2.50	5.00
SAN LUIS POTOSÍ	1.00	20.00
SONORA	0.20	7.50
TAMAULIPAS	1.00	4.00
ZACATECAS	1.00	90.00

## **CONCLUSIONES**

La mayoría de los reportes analizados, corresponden a muestras donde el contenido de oro es menor a 1 g/t, por lo tanto, fue más compleja la identificación de especies de oro, así como su asociación.

Las especies de oro que predominan en México son: electrum y oro nativo; seguidas de silvanita y calaverita, oro en cerargirita y oro en AgCuSe en menores cantidades.

El mapeo del electrum permitió demostrar que este se encuentra frecuentemente en los estados de Durango, San Luis Potosí y Zacatecas; mientras que el oro nativo en los estados de Querétaro y Zacatecas.

La mayor parte de las asociaciones binarias frecuentes, de las especies de oro están relacionadas con: especies de plata, sulfuros de hierro y cuarzo; y las asociaciones ternarias frecuentes son: especies de plata/pirita y especies de plata/cuarzo.

El estado de Zacatecas contiene la mayor frecuencia de especies de oro libre, asociados a especies de plata y especies de plata/piritas. Mientras que en los estados de Coahuila, San Luis Potosí y Estado de México muestran una mayor frecuencia de oro asociado a sulfuros de hierro. El estado de Guanajuato es quien más asociaciones binarias presenta.

La asociación del tipo oclusiones, es la que más predominan en la república mexicana, seguida de la asociación simple.

El tamaño de las partículas de oro fue menor a las 10 micras

## **AGRADECIMIENTOS**

Hacemos un profundo agradecimiento a la Maestra María del Carmen Ojeda Escamilla por la información invaluable que generó durante su tiempo dedicado a la UASLP para los estudios de investigación de caracterización mineralógica, así como a las autoridades del Instituto de Metalurgia de la UASLP por liberar y proporcionar los reportes de caracterización mineralógica para este trabajo.

## **REFERENCIAS**

Azamar Alonso, A. & Téllez Ramírez, I. (2022). Minería En México: Panorama Social, Ambiental Y Económico. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1, ISBN 978-607-626-061-6

Espinoza S., L. A., Iriarte D., G., Espinoza S., L. O., Gutarra B., R., Herrera M., M., Zamalloa B., J., Torres G., J. A. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 24(48), 85–100.

Dana, E. S. () Tratado de mineralogía,



Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Gali, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.

Secretaria de economía, servicio geológico mexicano (2020), *Panorama Minero del estado de Sonora*.

Petruk, W.(2000), *Applied mineralogy in the mining industry*,

