ORIGEN DE LOS YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MANTOS EN BAJA CALIFORNIA, MEXICO (*)

HIRONAO NISHIHARA (**)

R E S U M E N

Todas las teorías anteriores, incluyendo las correspondientes a las soluciones hidrotermales de origen magmático, volcanes submarinos de lodo, manantiales hidrotermales, enriquecimiento supergénético, y secreciones laterales, que se refieren a los yacimientos cupríferos del tipo de "manto" en la Baja California, carecen de las evidencias necesarias para poder sostenerse. No están de acuerdo con las observaciones sobre el terreno, que en muchos casos sugieren que la mineralización cuprífera fue transportada en solución, procedente de elevaciones circunvecinas y depositada con los sedimentos acumulados en el fondo del mar, de edad pliocena que cubría entoces aquellas regiones, en aguas poco profundas y posiblemente en la proximidad de la costa.

(*) Traducción del Dr. Jenaro González Reyna con autorización del autor, del original publicado en ECONOMIC GEOLOGY, Vol. 52, No. 8, diciembre de 1957.

(**) Doctor en Ciencias
Tokyo, Japón.

INTRODUCCION

En agosto de 1956 el autor formó parte de los participantes en una de las excursiones organizadas por el XX Congreso Geológico Internacional, reunido en México; con dicha excursión fue a El Boleo, Baja California, México, para estudiar el yacimiento cuprífero de aquel lugar y el yacimiento de manganeso denominado Lucifer. Allí, el autor se familiarizó con los argumentos fundamentales preconizados en las teorías anteriores y se dió cuenta de que no concuerdan con las evidencias de campo, mismas que han convencido al que esto escribe, del hecho de que los yacimientos cupríferos son de origen sedimentario, y no magmáticos, como se ha creído.

AGRADECIMIENTOS.—El autor desea hacer presentes sus agradecimientos al Sr. Victor H. Abrams, vice-presidente de la C. T. Takahashi de México, S. A., por su invitación para visitar México, así como por la amplia ayuda financiera recibida del Sr. C. T. Takahaschi, presidente de C. T. Takahashi y Compañía Inc. de Seattle, Wash., E.U.A., que hizo posible efectuar una extensa investigación geológica durante cinco meses. Deseo expresar mis agradecimientos especiales al Dr. Jenaro González-Reyna, Secretario General del XX Congreso Geológico Internacional, por su recomendación para participar como miembro presente en aquel evento, y así tener el privilegio de visitar aquellos yacimientos metalíferos de México, tan interesantes.

EL YACIMIENTO CUPRIFERO DE EL BOLEO

El distrito que se describe se localiza a los 27°10' de latitud norte, y a los 112°30' de longitud oeste, a unos 4 kilómetros al sur-poniente del pueblo de Santa Rosalía, sobre la costa oriental de la larga península de la Baja California, México.

YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MANTOS, BAJA CALIFORNIA.

Las formaciones del Plioceno más antiguo descansan sobre una superficie erosionada de los productos volcánicos Comondú, del Mioceno, consistentes en derrames de rocas andesíticas y basálticas, umbrales de esas rocas, tobas, brechas, aglomerados, conglomerados volcánicos y areniscas tobáceas. El Plioceno está integrado por: conglomerado basal, calizas y arenisca tobácea, formando cinco series sucesivas distintas. Al Plioceno Inferior se sobrepone el Plioceno Medio, existiendo entre ambos una discordancia. A su vez, el Plioceno Medio queda cubierto por el Plioceno Superior. En la parte inferior de cada serie sedimentaria, directamente sobre el conglomerado del Plioceno Inferior, pero no en el Plioceno Medio o en el Superior, se encuentran "mantos" horizontales conteniendo una mineralización cuprífera. Por manto se entiende (11) una capa o cuerpo estratificado, mineralizado que es peculiar en México. La extensión superficial del yacimiento en forma de manto es de aproximadamente 11 kms. NW-SE, por 2 km. NE-SW. El espesor o potencia de los mantos varía desde 20 hasta 100cm., con un promedio de 80 cm.

El mineral principal está constituido por una chalcocita de grano fino, diseminada en la arena tobácea, que contiene también y en cantidades subordinadas; chalcopirita, bornita, covellita y cobre nativo. La ganga incluye montmorillonita, óxidos de manganeso y fierro, yeso, calcita, calcedonia y jaspe. Los minerales cupríferos oxidados son silicatos y carbonatos. Los sedimentos aparecen cortados por numerosas fallas de edad reciente, que han desplazado a los mantos. La única roca intrusiva encontrada en el área es una cuarzo-monzonita, de edad pre-terciaria, que aflora en el distrito mineralizado de Lucifer, mas al norte y nor-poniente del distrito cuprífero de El Boleo suponiéndose que esa cuarzo-diorita queda abajo de los productos volcánicos Comondú. No se han descubierto rocas intrusivas de edad post-pliocénica.

GENESIS Y PROCESOS DE LA DEPOSITACION
MINERAL

El origen de los yacimientos cupríferos de El Boleo, así como los procesos que dieron lugar a su depositación han sido objeto de gran controversia, y numerosas opiniones y teorías han sido propuestas por quienes de esos yacimientos se han ocupado. Esas teorías y opiniones se revisan brevemente a continuación.

TINOCO (21) llegó a la conclusión de que fueron soluciones hidrotermales, ascendentes a lo largo de fallas en los depósitos volcánicos basales del Mioceno, las que produjeron la mineralización cuprífera en los sedimentos. Sin embargo, no se tiene evidencia que sugiriera posibles fallamientos anteriores a la mineralización, afectando a las formaciones volcánicas del Mioceno donde se supone se abrieron los canales alimentadores para la introducción de las soluciones mineralizadoras que pudieran haber depositado el cobre en los sedimentos del Plioceno en los cinco horizontes diferentes.

MARTÍNEZ BACA y SERVÍN LACEBRON (12) sugirieron que la introducción del cobre fue posterior a la sedimentación. No hacen referencia a la procedencia del cobre, ni a los procesos de depositación.

BOUGLISE y CUMENGE (2) sugieren que el cobre debe su origen a fuentes termales. Parece inconcebible que las fuentes termales pudieran aparecer en cinco períodos distintos de sedimentación.

YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MANTOS, BAJA CALIFORNIA.

FUCHS (4) consideró que los sedimentos tobáceos así como los minerales de cobre y manganeso contenidos en ellos deben su origen a erupciones volcánicas lodosas submarinas. Puesto que los cinco mantos mineralizados no están interconectados mediante canales o chimeneas de alimentación, se requerirían volcanes con erupciones de lodo para cada horizonte, en cada uno de los distintos períodos de sedimentación. En caso de haber habido muchos volcanes de lodo, entonces se tendría que considerar que las corrientes lodosas de erupciones procedentes de bocas volcánicas distintas, tendrían que dar origen a capas tobáceas de lodos que corresponderían a mantos cupríferos sobrepuestos o con estratificaciones cruzadas entre sí. Sin embargo, no se observa evidencia de tal naturaleza.

SALADIN (19) pensó que probablemente el cobre debe su origen a manantiales con aguas minerales y a erupciones lodosas emanando a través de fracturas abiertas en las formaciones volcánicas Comondú. Es difícil siquiera poder imaginarse cómo pueda haberse efectuado la depositación de los mantos cupríferos, tan regulares como extensos, en el horizonte correspondiente a cada una de las cinco capas en otros tantos períodos sucesivos.

POSEPNY (16) hizo una referencia especial al yacimiento cuprífero de El Boleo, expresando su punto de vista de que la repetición de una precipitación periódica de cobre en una hoyo o depresión en mar abierto, es imposible. Sugirió la ascensión de soluciones termo-minerales cupríferas, atravesando los conglomerados, mismas que depositaron el cobre en tobas suprayacentes después de haber sido reducidas por materia orgánica que probablemente allí se encontraba. Si se considera que los procesos de depositación del cobre en los sedimentos de cinco períodos distintos es correcta, entonces cabe preguntar: cómo pudo haber sido posible que las soluciones termo-minerales no hayan depositado el cobre en un solo horizonte, sino que lo hicieron también en los otros cuatro horizontes sedimentarios?

KRUSCH (7) ligó la asociación íntima de minerales de cobre manganeso y cobalto encontrados en el yacimiento de El Boleo, a la acción de fuentes termales cargadas de sílice. Hace referencia exclusivamente al origen de los minerales, pero concede escasa consideración al proceso de depositación.

WEED (23) indicó la ascensión de soluciones hidro-termales que silicificaron conglomerados permeables, depositando su carga de minerales de cobre y manganeso en las tobas arcillosas superiores. El conglomerado inmediatamente abajo de la capa mineralizada, no muestra evidencia de haber sido silicificado. En caso de que hubiera sido silicificado, habría actuado como una barrera a las soluciones ascendentes de cobre y manganeso, y en ese caso, la depositación de los minerales metálicos debería haberse efectuado simultáneamente con la ganga cuarzosa, abajo del conglomerado. Al juzgar por su afirmación, de que la toba subyace, en vez de sobreponerse al conglomerado, evidentemente ignoraba las condiciones del yacimiento.

DE LAUNAY (3) interpreta el yacimiento cuprífero de El Boleo, considerándolo como la concentración química de los minerales metálicos alterados derivados de las rocas ígneas. Además, fija el área ocupada por el yacimiento en la proximidad de las rocas ígneas, consideradas por él como originarias del yacimiento mineral epigenético. Parece que De Launay se influenció, para dar su interpretación, con la teoría del enriquecimiento secundario de los sulfuros. Sin embargo, es difícil imaginarse cómo puede haberse originado la mineralización en cinco horizontes distintos y no haber dejado ningún rastro de "sombreros de hierro" en la porción superior, o sulfuros primarios sin oxidar abajo de la zona de los sulfuros secundarios.

TOUWAIDE (22) pensó que el origen del cobre podría considerarse como derivado de minerales de cobre contenidos en las tobas, que fueron oxidados y luego disueltos y lixiviados por aguas subterráneas y aguas de infiltración que lo transpor-

YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MANTOS, BAJA CALIFORNIA.

taron en solución en forma de sulfatos. Touwaide cree que las aguas subterráneas y de infiltración tenían la acidez necesaria para haber oxidado y lixiviado el cobre contenido en los sulfuros primarios de dicho metal, contenidos en las tobas. Los procesos de oxidación, como los ha sugerido, debieron efectuarse en la superficie de cada capa sedimentaria, antes de hacerlo en la siguiente capa de sedimentación. En ninguna parte del horizonte superior de la toba se encuentran manchas de oxidación (sombrero de fierro) o limonita, que indicaran la oxidación de pirita o chalcopirita y la formación o generación de ácido sulfúrico. Además, si las partículas pequeñas de chalcocita, diseminadas, se hubieran depositado como consecuencia de reducción de la acidez de las soluciones descendentes, entonces el núcleo debería estar constituido, preferentemente, por chalcopirita o pirita primarias. No existe evidencia que pudiera sostener la sugestión hecha por Touwaide.

BELLANGER (1) hizo notar la presencia de pequeñas fracturas producidas por fallamientos, a través de las cuales ascendieron soluciones conteniendo cobre y manganeso, que luego depositaron su carga. Su inferencia de una mineralización a través de las fallas correspondientes a una época posterior a la mineralización, no cabe tomarse en consideración.

PEÑA (15) expresó su punto de vista, indicando que soluciones mineralizadoras circulantes, de baja temperatura, depositaron el cobre en las series sedimentarias localizadas abajo de la cubierta impermeable de la toba arcillosa. No explicó la posibilidad de la depositación cuprífera en los cinco horizontes distintos de los sedimentos. Así mismo, no hizo referencia al origen de las soluciones mineralizadoras, ni a los conductos y cursos que tomaron esas soluciones ascendentes. La presencia de carbón libre, en algunos casos hasta alcanzar 3 por ciento, así como fragmentos de madera silicificados o cubiertos por una capa de chalcocita, se han mencionado como prueba de reducción y precipitación de los minerales de cobre y manganeso. La preci-

pitación del metal en solución, debería ser precedida por la reducción de la acidez de la solución.

LOCKE (10) critica el contenido de 0.2 por ciento de cobre en la roca ignea original, de la que, según Touwaide, se derivó el cobre por procesos de lixiviación, y ofrece una teoría para explicar la génesis de los granos de chalcocita, distribuidos de modo tan uniforme en las tobas arcillosas, como depositados por soluciones ascendentes que se difundieron a través de fracturas y caminos que se cruzaban entre sí. Parece que este autor no ha hecho referencia al origen de la solución mineralizadora y se abstuvo de explicar el proceso que hizo posible la formación de yacimientos en forma de manto en cinco horizontes distintos de la serie sedimentaria.

El tratado más elaborado y comprensivo sobre los yacimientos cupríferos de El Boleo, está constituido por el informe reciente del Dr. IVAN F. WILSON (24). Wilson favorece la teoría de las soluciones hidrotermales ascendentes, de origen magmático. A fin de teorizar con sus razonamientos, el autor citado construyó su diagrama de sección ideal (25) que muestra formaciones volcánicas Comondú que sobresalen y que tienen superficies de erosión de pendientes suaves, sobre las cuales descansan las series sedimentarias del Plioceno Inferior y más antiguo que reúne a los cinco horizontes diferentes de las capas mineralizadas, con su correspondiente conglomerado subyacente. En las formaciones volcánicas Comondú se indican tres fallas prominentes, mismas que terminan en la superficie de erosión correspondiente al Comondú, suponiéndose que corresponden a una sedimentación post-Comondú y pre-Boleo, aunque en la sección geológica, lámina 3, las fallas quedan indicadas como iniciándose en el Pleistoceno (Santa Rosalia). Además, una de las tres y mas profundas fallas llega a la superficie de erosión, precisamente abajo de la capa inferior número 4; la segunda falla alcanza la superficie de erosión en contacto con la número 4 de tobas, y abajo de la número 3: conglomerado; la tercera falla alcanza la superficie de erosión en contacto con la toba entre

la capa mineralizada número 3, abajo, y la número 2, conglomerado, arriba. Algunas flechas que apuntan hacia arriba, dibujadas sobre el lado del alto de cada falla, aunque no se indica si normales o inversas, son con el objeto de significar el origen y cursos seguidos por las soluciones minerales ascendentes. Además, las flechas en la falla número 1 indican las entradas de la solución mineralizadora al manto superpuesto de tobas; en la falla número 2, al conglomerado superyacente; en la falla número 3, entrada a las tobas del número 2 y un poquito más abajo del conglomerado número 2, así como la inundación de las soluciones por cada salida fluyendo hacia arriba siguiendo el plano de contacto de las Comondú y Boleo, según lo indicado con las flechas; las soluciones abriéndose paso a través de la corriente que fluía, o tal vez y con mayor posibilidad, alcanzaron el acceso después de haber cesado la corriente penetrando en las capas de tobas. Wilson infiere que las soluciones mineralizadoras ascendieron a través del conglomerado y que quedaron atrapadas abajo de la toba arcillosa impermeable y difundidas dentro de la toba arcillosa superior, donde el cobre se depositó en la forma de chalcocita. Así pues, tal parece que el diagrama del autor está hipotéticamente basado en su propia concepción, y que no representa datos efectivos.

Todos los sedimentos del Plioceno Inferior, Medio y Superior, así como los del Pleistoceno, se depositaron en el mar, sobre la superficie erosionada, de las formaciones Comondú, del Mioceno.

Todas las fallas que cortan y desplazan a estos sedimentos y mantos mineralizados corresponden, sin duda, a una época posterior a la sedimentación y a la mineralización.

Algunas de esas fallas post-mineralización, pudieron haberse extendido mas abajo penetrando a las formaciones volcánicas Comondú, correspondientes al Mioceno, pero estaría fuera de toda consideración tratar de considerarlas como si hubieran servido de canales a las soluciones mineralizadoras que hayan contribuido a la formación de estos yacimientos minerales en forma de mantos.

Cualesquiera grietas, diques, vetas, o fallas formadas en las formaciones volcánicas Comondú después de su consolidación o mucho antes de la depositación de los sedimentos del Plioceno, quedarían contenidas en las formaciones volcánicas y no podrían establecer relaciones genéticas directas con los sedimentos posteriores del Plioceno y Pleistoceno, o con yacimientos minerales allí incluídos.

El autor sugiere que las soluciones termales portadoras de la mineralización cuprífera ascendieron siguiendo las fallas y grietas que muy posiblemente se abrieron en las formaciones volcánicas Comondú, debido a un cuerpo intrusivo posterior. Dicho cuerpo intrusivo, debemos hacer notar, no se encuentra en el terreno, sino que se infiere que existe abajo del Comondú. Si tal es el caso, entonces no sólo las fallas y grietas debieron cortar a las formaciones Comondú, sino también las vetas o diques, extendiéndose hasta los sedimentos sobreyacentes donde debieron formarse vetas de fractura o yacimientos de reemplazo en el contacto con las calizas. Teniendo en cuenta lo antes dicho, las formaciones volcánicas Comondú deberían explorarse en busca de yacimientos cupríferos más grandes y más ricos, pero desgraciadamente no se han encontrado evidencias que pudieran sustanciar las sugerencias hechas.

El autor considera, por los diagramas ideales, que las soluciones portadoras de la mineralización cuprífera ascendieron atravesando al Comondú y fluyendo en las series sedimentarias sobreyacentes para allí depositar cobre y manganeso en la toba, después de difundirse hacia arriba al través del conglomerado.

Es casi incomprensible que soluciones ascendentes pudieran depositar minerales de cobre y manganeso en un horizonte definido, o inmediatamente arriba de la capa de conglomerado de las cinco series sedimentarias diferentes, sin haber depositado cobre o manganeso en o abajo del conglomerado, o en las tobas inferiores.

El contacto entre la superficie erosionada de las formaciones Comondú del Mioceno y los sedimentos posteriores, podría

YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MANTOS, BAJA CALIFORNIA.

considerarse como un plano o canal favorable para soluciones ascendentes del post-Plioceno. Sería más plausible presumir que las soluciones minerales inferidas encontraron una vía de acceso más fácil hacia los lugares donde se efectuó la depositación mineral siguiendo esta amplia zona de contacto y no en los cinco horizontes separados de sedimentos de tobas arcillosas impermeables, con espesor de más de 200 metros. En esta zona de contacto no se han encontrado, hasta ahora, yacimientos de valor económico a la profundidad. Tampoco se han localizado en grietas o fisuras, o en vetas derivadas del canal, que pudieran considerarse como posibles alimentadoras de las soluciones minerales, a cada uno de los horizontes mineralizados que constituyen los mantos.

ORIGEN POSIBLE DEL COBRE.

TOUWAIDE (22) sugirió que el origen de la mineralización cuprífera se encontraba en las formaciones volcánicas Comondú, y las estimó con un contenido de 0.20 por ciento. WILSON (24), sin embargo, llamó la atención a los resultados de sus análisis, hechos con material fresco de las formaciones volcánicas Comondú, que mostraron tan sólo un contenido de 0.007 por ciento de cobre. También hizo referencia al valor promedio de 0.018 por ciento de cobre, obtenido de los análisis de 169 muestras de rocas ígneas.

Ya que ningún mineral de cobre puede considerarse como uno de los constituyentes que forman las rocas ígneas, entonces las cantidades variables de cobre en la formación volcánica Comondú, en la toba, o en cualesquiera otra roca ígnea, no deberían tener ingerencia directa en el problema que se discute.

Se da por bien sentado el hecho de que la abundancia de cobre en las rocas ígneas es mayor en las básicas y menor en las rocas ácidas (17). Los ejemplos correspondientes a la amplia distribución de cobre nativo, chalcocita y bornita con epidota, calcita y zeolitas, son bien conocidos en los basaltos

Precámbricos de la región de Lake Superior (8); en las andesitas porfiríticas vesiculares de Austria se tienen cobre nativo, chalcocita y bornita, malaquita y azurita. Lo mismo ocurre en la costa occidental de la isla de Cebú, en las Filipinas (13), y se encontró cobre nativo, malaquita, azurita y chalcocita en las andesitas porfiríticas de una mina abandonada, a 6 kilómetros al norte de San Miguel, Jalisco, México (14), lo que sugiere de manera muy enfática, la posible ocurrencia de yacimientos minerales cupríferos primarios, contenidos en las formaciones volcánicas andesíticas y latíticas Comondú, próximas a la superficie antes de la denudación del Plioceno.

Por otro lado, el origen del cobre no debe estar necesariamente sujeto de manera exclusiva a las formaciones volcánicas Comondú. Las rocas ígneas pre-terciarias, preferentemente extrusivas, de las prominencias vecinas, pueden haber proporcionado a las aguas de los mares del Plioceno, no solamente cobre, sino también otros elementos metálicos y no-metálicos en solución, o como detritus finos.

El ciclo del cobre ha sido ampliamente tratado por RANKAMA (18) desde el punto de vista geoquímico. El intemperismo descompone a sulfuros primarios de cobre y fierro, como la chalcopirita y la bornita; los metales entran en solución como sulfato de cobre y sulfato ferroso, oxidándose rápidamente este último para dar origen a ácido sulfúrico e hidróxido férrico, mientras de que el sulfato de cobre ni migra hacia niveles inferiores, ni tampoco es acarreado hacia la corriente. Es posible que los minerales de cobre, procediendo de tierras inmediatas, hayan sido transportados parcialmente en forma de partículas pequeñas, así como también en solución, para ser depositados con los sedimentos. Si la solución de sulfato cúprico se pone en contacto con lodos sapropélicos en aguas poco profundas, se reduce el cobre y entonces se precipita como sulfuro, y teniendo las condiciones y circunstancias favorables para la depositación entonces es posible la formación de grandes yacimientos cupríferos sedimentarios.

YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN MANTOS, BAJA CALIFORNIA.

Así pues, los yacimientos cupríferos sedimentarios se caracterizan por: 1) ausencia de rocas ígneas en las cercanías, o en caso de tenerlas, son de edad anterior a los yacimientos de cobre; 2) las estratificaciones sedimentarias con minerales cupríferos corresponden a capas terrígenas o formadas en aguas poco profundas; 3) el mineral principal aparece como chalcocita reemplazando a materiales carbonáceos o calcáreos con chalcopirita y bornita en cantidad subordinada, y 4) los minerales de la ganga consisten por lo general de calcita, yeso y barita con un poco de cuarzo.

Uno de los mejores ejemplos que pueden citarse es el yacimiento de Kupferschiefer, de Mansfeld, Alemania (2), que se dice es de origen sedimentario y constituye uno de los mejores ejemplos de este tipo de criadero. Se le ha incluido en una serie de sedimentos correspondientes al Pérmico Superior que consisten, en su orden ascendente, de un conglomerado basal, lutitas carbonosas y calcáreas conteniendo sulfuros de cobre diseminados en forma de partículas finas; además, caliza, yeso y sal. Lo anterior tipifica circunstancias geoquímicas favorables en las que se considera que la depositación de cobre fue posible con sedimentos lodosos en mares poco profundos.

RESUMEN Y CONCLUSION

Todas las teorías previamente enunciadas, con especialidad la de las soluciones hidrotermales de origen magmático, parece que no cabe aplicarlas para explicar la génesis que corresponde a los yacimientos cupríferos de El Boleo.

Los cinco yacimientos cupríferos en forma de mantos se encuentran invariablemente confinados dentro de los sedimentos y se terminan en el contacto con el Mioceno, correspondiente a las formaciones volcánicas Comondú; cada manto aparece independiente de los demás y no se intercomunican entre sí.

Es una deducción incierta, para quienes se inclinan por sostener un origen ígneo, sugerir un cuerpo ígneo intrusivo de edad

post pliocena que se introdujo en las formaciones volcánicas Comondú, y que a él se debe la introducción de los minerales de cobre contenidos en los sedimentos sobreyacentes del Plioceno Inferior, hasta donde llegaron siguiendo fallas que cortan al Plioceno y desplazan a los yacimientos minerales que afectan la forma de capas.

En consecuencia, ningún argumento basado sobre la teoría de las soluciones hidrotermales parece aplicable y capaz de explicar los procesos de depositación correspondientes a los yacimientos cupríferos de El Boleo, en forma de mantos

Por lo que respecta al origen del cobre, nos parece que cualesquiera extrusivo: andesítico o basáltico, incluyendo las rocas andesíticas y latíticas del Mioceno que corresponden a las formaciones volcánicas Comondú, pudieron haber proporcionado el cobre gracias al intemperismo de sulfuros de cobre y fierro, cuya ocurrencia estaba próxima a la superficie. El cobre pudo haber sido transportado como restos finos, o en solución como un sulfato junto con restos tobáceos hacia las aguas marinas poco profundas del Plioceno. La reducción, precipitación, concentración y depositación del cobre en forma de sulfuros se efectuó, probablemente, en los fondos lodosos, carbonosos, calcáreos y yesíferos de la planicie costera que se hundía. La asociación íntima de los minerales de cobre con el óxido de manganeso constituye otra indicación de la depositación efectuada en aguas poco profundas y también sugiere tener una íntima relación genética con los yacimientos vecinos de manganeso, denominados Lucifer, que aparecen en las mismas formaciones sedimentarias del Plioceno.

REFERENCIAS

1. Bellanger, A. J., 1931, Mining copper in Baja California: Eng. and Min. World, v. 2, p. 768-774.
2. Bouglise, G. de la, y Cumenge, E., 1885, Etude sur le district cuprifere du Boleo, B. C.: Paris.
3. De Launay, L., 1915, Traité de Métallogénie; Gîtes minéraux et métallifères, tomo 2: Paris y Lieja.
4. Fuchs, Edmond, 1886, Note sur le gite de cuivre du Boleo: Boletín de la Soc. Géol. France, 3a. serie, tomo 14.
5. Graton, L. C., 1940, Nature of the ore-forming fluid: Econ. Geol. v. 35, no. 2.
6. Idem.
7. Krusch, P., 1899, Ueber eine Kpfererzla gerstaette in Nieder-Californien: Zeitschr. prakt. Geologie, v. 7.
8. Lindgren, Waldemar, 1933, Mineral Deposits, 4a. ed., p. 518.
9. Idem, p. 408.
10. Locke, Augustus, 1935, The Boleo copper area, Baja California, Mxico: Copper Resources of the World, v. 1, Washington, XVI Congreso Geolgico Internacional.
11. McKinstry, Hugh E., 1953, Mining Geology: p.647.

12. Martínez Baca y Servin Lacebron, Informe sobre las minas de cobre del Boleo en 1896; Ministerio Fomento Repub. Mexicana, tomo 11, p.1-40.
13. Nishihara, H., De las notas de campo en Las Filipinas, Oct. 1955-Ene. 1956.
14. De las notas de campo en México, Jun. Dic. 1956.
15. Peña, Salvador, 1931. Las minas que actualmente explota la Compañía del Boleo, S. A., de Santa Rosalia, Territorio Sur de la Baja California: Bol. Minero, tomo 31.
16. Posepny, Franz, 1894, The genesis of ore deposits: Am. Inst. Min. Eng. v, 23.
17. Rankama, K. y Sahama, Th. G., 1952, Geochemistry, p. 697.
18. Idem p. 698-700.
19. Saladin, Ed., 1892. Note sur les mines de cuivre du Boleo: de la Soc Ind. Min. 3a. serie, tomo 6.
20. Stelzner y Bergeat, 1904, Die Erzlagerstaetten, 1, 391-417.
21. Tinoco, M., 1885, Informe acerca del Distrito mineral de Santa Agueda, México; Tipografía Literaria.
22. Touwaide, M. E., 1930, Origin of the Boleo copper deposit, Lower California, Mexico: Econ. Geol. v. 25, p. 113-114.
23. Weed, W. H. 1907, The Copper Mines of the World.
24. Wilson, Ivan F. y Rocha, Victor S., 1955, Geology and mineral deposits of the Boleo copper district, Baja California, México: Servicio Geológico de los Estados Unidos. Trabajo profesional 273.
25. Idem p. 86.