



AIMMGM
XXIX Convención Internacional de Minería
Acapulco, Guerrero, México
Octubre 26-29, 2011

ACTA DE SESIONES



Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y
Geólogos de México, A.C.

ISBN 978-607-95292-2-2

DEPÓSITOS TIPO “SIMPLE-Sb” EN MÉXICO Y EL CINTURÓN ANTIMONÍFERO MEXICANO

Eduardo Mascuñano¹, Gilles Levesse^{1,*}, Jordi Tritlla², Esteve Cardellach³ y Rodolfo Corona-Esquivel^{4,5}

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Querétaro, México.

²Repsol Exploración, Paseo de la Castellana 280, 28046 Madrid, España.

³Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, España.

⁴Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

⁵División de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN.

*E-mail: glevresse@geociencias.unam.mx

RESUMEN

Los depósitos de antimonio simple, del inglés “simple-Sb”, están formados por vetas compuestas principalmente por antimonita y cuarzo, con trazas o no de Hg y Au. Estos depósitos suelen formarse en zonas de cizalla, en contextos tectónicos sin/post-orogénicos. Algunos de estos yacimientos reconocidos en México presentan además cuerpos mineralizados estratoligados formados por la intersección de las vetas de antimonio simple con niveles evaporíticos de yeso sulfatorreducidos, portadores de H₂S. Pero en todos los casos, los yacimientos presentan características geológicas similares y una paragénesis sencilla. A escala regional, los yacimientos se encuentran claramente alineados en una franja que hemos denominado Cinturón Antimonífero Mexicano. Adicionalmente, los distritos parecen ser contemporáneos y ninguno de ellos presenta una correlación clara con los eventos magmáticos. A partir del estudio de las características y distribución de este tipo de yacimiento en México, proponemos que la ubicación de este tipo de depósito esté controlada por: (i) procesos ligados a la dinámica de la zona de subducción responsable de enriquecer en antimonio de forma localizada determinadas zonas de la cuña mantélica, y (ii) la dinámica post-orogénica, que facilita la generación de fundidos de composición peraluminica responsables de la concentración del Sb en una fase fluida residual y genera las discontinuidades corticales necesarias para la circulación de los fluidos hipogénicos.

ABSTRACT

Simple Sb deposits consist of veins formed mainly with stibnite, quartz with traces of Au and Hg. These deposits occur in shear zones usually in the syn/post-orogenic geotectonic environments. Our study is an overview of the features and distribution of this kind of deposits in Mexico. Besides the classical simple-Sb veins, in central and southern Mexico, some stratabound ore deposits were found. They are generated by the intersection of these simple-Sb veins with diagenetic evaporites. All the deposits recognized during this study present similar geological settings and very simple parageneses. In addition, the major districts studied seem to be contemporaneous and none of them presents a clear correlation with magmatic events.

1. YACIMIENTOS DE ANTIMONIO SIMPLE

Los yacimientos de antimonio simple se emplazan en zonas de cizalla relacionadas con los estadios finales de la dinámica orogénica, en rocas encajonantes no metamórficas y a bajas temperaturas (Dill *et al.*, 1998). Su mineralogía es simple. Está formada por antimonita y, en ocasiones, arsenopirita con trazas de Pb-Cu-Zn y contenidos bajos en Au. Los minerales de ganga son cuarzo (predominantemente) y/o calcita. No existe consenso sobre cuál es el origen de los fluidos mineralizantes, pero algunos autores (Boiron *et al.*, 2001; Neiva *et al.*, 2008) sugieren que estos fluidos hayan tenido un origen profundo y que hayan sido canalizados por zonas de debilidad durante eventos de deformación regional. Se desconoce tanto la fuente de los metales como el origen del fluido que da lugar a estos yacimientos.

2. YACIMIENTOS DE ANTIMONIO SIMPLE EN MÉXICO

Como muestra la Figura 1, los yacimientos de antimonio simple en México se distribuyen siguiendo una lineación a lo largo del límite E de la Sierra Madre Occidental (SMOc), al que hemos llamado Cinturón Antimonífero Mexicano (CAM). Esta lineación no está relacionada con la distribución de la SMOc (Oligocénico a Miocénico), ni con la cobertura volcánica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), de edad miocénica (ver Figura 1A). Todos los yacimientos están ubicados en la corteza continental de Oaxaquia y en el terreno mixteco hacia el sur. No existe una correlación directa entre la disposición de los yacimientos y el espesor cortical (Figura 1B). A pesar de su amplia distribución regional, la mayoría de estos depósitos comparte características comunes. Todos ellos están localizados en trampas estructurales o estratigráficas en rocas que van desde el Triásico hasta el Jurásico Superior.

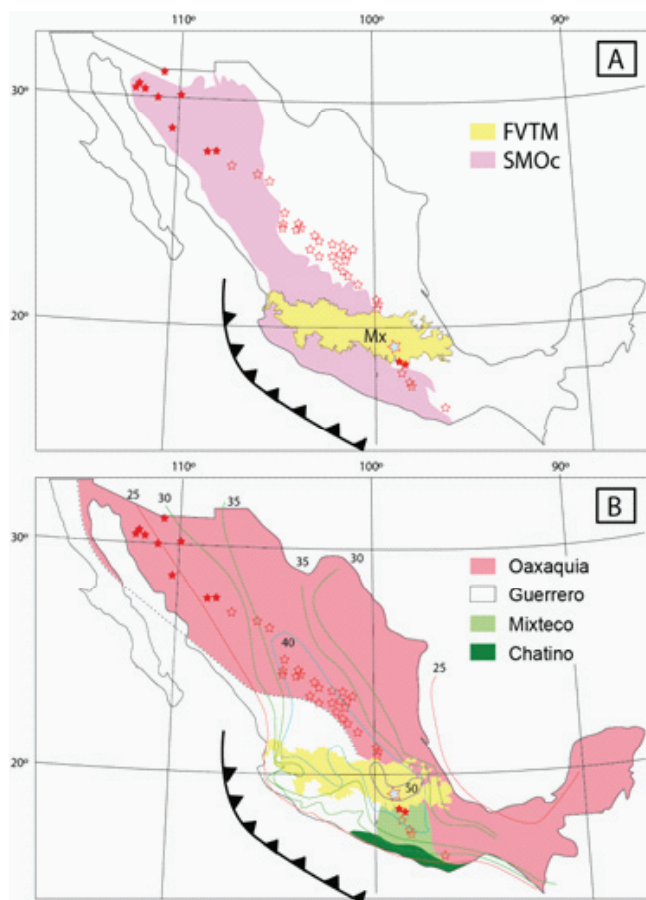


Figura 1. Distribución de los yacimientos de antimonio simple en México. (A) FVTM: Faja Volcánica Trans Mexicana; SMOc: Sierra Madre Occidental; (B) Límites de los terrenos; Líneas: espesor cortical acutal. Las isopacas están espaciadas 5 km, y posición de la zona de subducción (Molina-Garza *et al.*, 1993). Las estrellas huecas corresponden a los yacimientos que se emplazan en rocas calizas. Las estrellas rellenas corresponden a yacimientos encajados en formaciones siliciclásticas.

La paragénesis primaria está conformada exclusivamente por antimonita, calcedonia y calcita. En algunas de estas minas, se ha encontrado cristales euhedrales de antimonita de gran tamaño como algunos reconocidos en las minas de San José de Tierras Negras – Wadley, en Real de Catorce, SLP, de 50 cm de largo, 10 cm de ancho y 8 cm de grosor. Normalmente, se suele encontrar estos cristales parcial o completamente pseudometamorfizados por óxidos de antimonio, formados por la oxidación de estos sulfuros primarios. También es común encontrar acumulaciones pulverulentas de óxidos o hidróxidos de antimonio usualmente como estibiconita, formada a partir de la oxidación de las fases hipogénicas.

2.1 YACIMIENTOS EN VETAS EN EL NORTE DE MÉXICO

En el norte de México (Distrito el Antimonio, Sonora), los yacimientos de antimonio simple están emplazados en for-

maciones triásicas siliciclásticas, calizas del Jurásico Inferior e intrusivos granodioríticos de edad paleocena. El mineral se encuentra en vetas de diversas orientaciones. Como norma general, estas vetas presentan un tamaño mayor en las formaciones siliciclásticas que en las carbonáticas. Las vetas de antimonita y cuarzo aparentemente evitan la caliza, incluso en aquellos lugares donde es abundante. No se ha descrito mineralización en la caliza pérmica.

En general, los cuerpos mineralizados se emplazan en fallas transcurrentes invertidas (Figura 2A), que cortan las rocas sedimentarias de forma paralela o casi paralela a la estratificación. La paragénesis está formada por cuarzo lechoso de grano grueso, antimonita y calcedonia con óxidos de antimonio. Se ha encontrado también plata y oro nativo en algunas vetas, pero parecen relacionados a un evento hidrotermal tardío (El Palo Verde; White and Guiza, 1949).

2.2 YACIMIENTOS ESTRATOLIGADOS DEL CENTRO Y SUR DE MÉXICO

La mayoría de los yacimientos de antimonio simple del centro y sur del país (Wadley, S.L.P.; Soyatal, Qro.; Los Tejocotes, Oax.) están encajados en calizas de edades comprendidas entre el Jurásico Medio y el Jurásico Tardío. El emplazamiento se ha realizado principalmente en trampas estructurales, como anticlinales sobreyacidos por formaciones arcillosas, o en fallas (de cizalla o inversas) selladas también por formaciones arcillosas que actuaron de cobertura impermeable para los fluidos mineralizantes ascendentes; no obstante, algunos de los yacimientos examinados en el presente estudio no presentaban esta cobertura arcillosa. En Los Tejocotes (White y Guiza, 1945) y Wadley, la mineralización antimonífera está controlada, además de por los factores ya mencionados, por la presencia de unos niveles de calcita blanca con un alto contenido en ácido sulfhídrico en forma de inclusiones fluidas, que originalmente eran lechos evaporíticos de yeso y que fueron parcialmente sulfatorreducidos durante la diagénesis. De nuevo, la paragénesis mineral es sencilla, está formada por una ganga de cuarzo microcristalino o jaseroide con abundancias variables de calcita. La mineralización hipogénica está formada por antimonita y trazas de pirita. En algunos yacimientos la antimonita se encuentra oxidada casi en su totalidad y el antimonio presenta indicios de removilización, como evidencian algunas las masas de óxido de antimonio pulverulento de hasta varias toneladas encontradas en cavidades dentro de la formación carbonática encajante.

En el yacimiento de Wadley, en la Sierra de Catorce, se encuentran intrusivos peraluminicos post-orogénicos mineralizados por vetas de Ag-Pb-Zn, pero este evento parece post-datar la mineralización antimonífera.

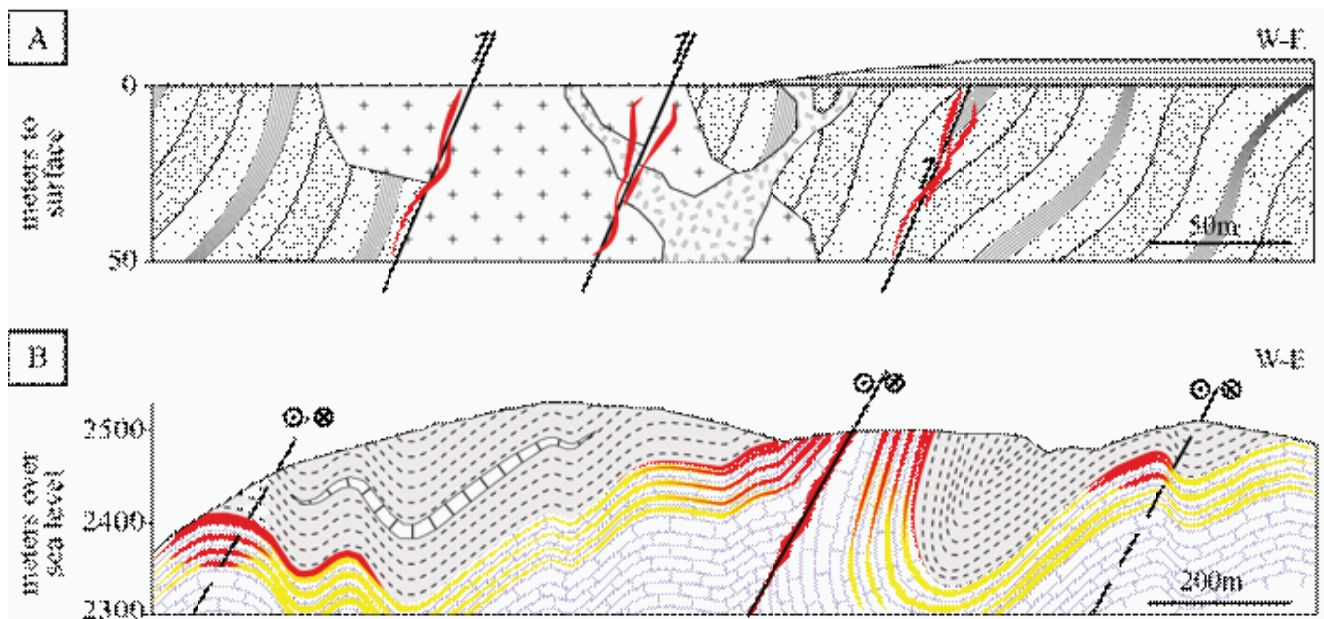


Figura 2. Sección esquemática de los yacimientos seleccionados. La mineralización económica está en rojo. (A) Sección genérica del distrito El Antimonio, Sonora, en el norte de México. El antimonio está en vetas de cuarzo-antimonita, encajadas en las formaciones siliciclásticas triásicas, intruidas por granodioritas de edad paleocénica a eocénica. (B) Sección del yacimiento de Wadley en San Luis Potosí, en la parte central de México. El antimonio está acumulado tanto en las vetas de antimonita-cuarzo, como en los niveles de yeso evaporítico, en la actualidad sulfatorreducidos y convertidos a calcita fétida (color amarillo), ubicados en el tramo final de la caliza de la Formación Zuloaga (Oxfordiano), sobreyacida por la formación arcillosa de La Caja (Titaniano).

3. EDAD DE LOS YACIMIENTOS DE ANTIMONIO SIMPLE EN LA PARTE CENTRAL DE MÉXICO

La ausencia de minerales datables en la secuencia paragénetica y su complicada relación con los cuerpos intrusivos complica la determinación exacta de la edad de emplazamiento. De hecho, hasta la fecha, ningún yacimiento de antimonio simple en México ha sido datado. No obstante, al menos en el yacimiento de Wadley (SLP), la geología regional y el magmatismo permiten hacer una estimación de la edad del yacimiento. Los mantos que contienen la mineralización están plegados, pero no los cristales de antimonita que albergan, a pesar de ser fácilmente deformables por su escasa tenacidad. El plegamiento del extremo nororiental de la Mesa Central, donde se encuentra la Sierra de Catorce que aloja el yacimiento, está fechado en *ca.* 62 Ma. (Fritz-Díaz, 2001). Las fallas transcurrentes que canalizan los fluidos mineralizantes están desarrolladas durante la transición del régimen tectónico compresivo a distensivo. Este hecho es evidenciado por la asimetría de los pliegues a un lado y otro de alguna de las fallas direccionales mayores de la Sierra de Catorce. Tanto los mantos como las fallas direccionales están cortados por fallas normales posteriores que, a su vez, han sido intruidas por cuerpos granodioríticos. El fechamiento

de estas granodioritas arrojó una edad de *ca.* 42 Ma. Por lo tanto, sugerimos que el episodio mineralizador haya sucedido entre los *ca.* 62 y los *ca.* 42 Ma, durante la transición entre el régimen orogénico compresivo hacia la distensión post-orogénica.

4. MODELO GENÉTICO

Todos los yacimientos de antimonio reconocidos en este estudio presentan una serie de características comunes. Todos ellos están alojados en corteza continental, particularmente en rocas sedimentarias jurásicas; en todos ellos los fluidos mineralizantes circularon a través de fallas inversas o transcurrentes; ninguno presenta una relación directa con magmatismo alguno y todos ellos presentan una paragénesis simple, basada en antimonita con escasez de otros sulfuros y cuarzo como ganga principal. La mineralización parece darse siempre durante la transición entre el régimen compresivo orogénico y la extensión post-orogénica.

El Cinturón Antimonífero Mexicano sigue una curva bien definida, que se dispone aproximadamente en forma paralela a la zona de subducción. A pesar de la anchura de las zonas orogénicas (en especial en la parte central de México) los yacimientos se disponen en una franja de anchura muy

reducida, lo que indica que este tipo de yacimientos se da sólo bajo condiciones muy singulares.

En México, la propagación del frente orogénico laramídico está directamente relacionada con la evolución de la zona de subducción, más concretamente con el episodio de subducción plana en la parte central de México. Las zonas de subducción actúan como un mecanismo de reciclaje de elementos a escala cortical. Existe una relación entre la estructura térmica de la zona de subducción y la eficiencia en el transporte de elementos volátiles hacia zonas mantélicas profundas (Abbott y Lyle, 1984; Staudigel y King, 1992). La corteza oceánica fría (más antigua) subduce más rápidamente que la caliente y los elementos volátiles son retenidos en ella por más tiempo, siendo desprendidos en zonas mantélicas más profundas o a mayor distancia de la zona de subducción. Bebout *et al.* (1999) demostraron que el antimonio no es liberado de los materiales subducidos (sedimentos y materiales basálticos), hasta que la corteza alcanza las condiciones metamórficas de la facies de anfibolita. Cuando esto sucede, la roca sufre un empobrecimiento súbito de Sb de entorno a un 90%. Esto debe reflejarse en un enriquecimiento selectivo de antimonio restringido a determinadas partes metasomatizadas de la cuña mantélica, localizadas en función del régimen térmico o del ángulo de la subducción. Las zonas de subducción plana alcanzarán las condiciones necesarias para la expulsión del Sb en zonas más distales que las zonas de subducción con un ángulo de subducción más pronunciado.

Guo (2008) determinó experimentalmente el coeficiente de partición del antimonio entre fundidos magmáticos de composiciones ácidas y la fase fluida residual y observó que la concentración del antimonio en la fase fluida incrementa drásticamente al incrementar el ASI, del inglés Alkali Saturation Index. Los granitos post-orogénicos son altamente evolucionados por tener una mayor contaminación cortical y muchos de ellos son peraluminicos (ASI > 1; Maniar y Piccoli [1989]).

Por ello, un alto porcentaje del Sb contenido en esta cuña mantélica debe ser movilizado durante los eventos magmáticos que caracterizan los estadios orogénicos tardíos y concentrado en un fluido granítico residual. Si además tenemos en cuenta que el Sb presenta una elevada afinidad calcófila, es moderadamente volátil y es considerado uno de los elementos metálicos más móvil después del Hg (Laznika, 1999), podemos sugerir que el antimonio presente un bajo grado de asimilación en las rocas corticales, facilitando la formación de yacimientos minerales en condiciones casi superficiales, en caso de que existan los mecanismos necesarios para canalizar el fluido generado por el fundido magmático peraluminico. Por ello, cabe esperar que los yacimientos

antimoníferos derivados de este proceso sean emplazados en la corteza millones de años antes que su granito peraluminico parental, lo que dificulta establecer una posible relación entre ambos eventos.

CONCLUSIÓN

La mayoría de yacimientos de antimonio en México son de tipo antimonio simple y comparten numerosas características. Todos los yacimientos estudiados están desarrollados sobre rocas sedimentarias no metamórficas de edades principalmente jurásicas e independientemente de los espesores corticales registrados en las localidades que albergan los yacimientos. Todos ellos comparten paragénesis muy similares. Los distritos más importantes presentan aparentemente la misma edad (Paleoceno a Eoceno), y todos ellos están emplazados en un contexto post-orogénico. La distribución de estos yacimientos está restringida a un fino cinturón antimonífero reconocible a escala regional (Cinturón Antimonífero Mexicano).

Todo lo anterior sugiere un origen común para la mayor parte de yacimientos antimoníferos en México ligado a la dinámica de la zona de subducción. El mecanismo de formación de estos yacimientos incluiría: (i) una cuña mantélica metasomatizada, de distribución muy restringida y enriquecida en antimonio por los fluidos derivados del metamorfismo de la corteza subducida; y (ii) la existencia de un proceso orogénico que produzca discontinuidades a escala cortical y fundidos de composición peraluminica (granitos post-orogénicos) capaces de movilizar el antimonio y concentrarlo en la fase fluida. La curvatura del Cinturón Antimonífero Mexicano en la parte central de México es consistente con la subducción plana descrita en esta zona. A partir de estas evidencias, los autores concluyen que estos yacimientos fueron formados después del último evento compresivo de la orogenia Laramide, durante episodios distensivos tempranos, en un contexto post-orogénico, posiblemente favorecidos por un "roll-back" o ruptura de la corteza subducida, y que están relacionados de algún modo con los granitos peraluminicos post-orogénicos.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Lic. José Cerrillo Chowell, Director General de la Negociación Minera Santa María de La Paz y Anexas, S.A. de C.V., por el apoyo recibido mientras se llevaba a cabo este estudio. Este estudio fue financiado por UNAM-PAPIIT, proyectos IN100707, IN109410-3, y CONACYT proyecto 81584. Corona-Esquivel, agradece a las autoridades del Instituto de Geología, UNAM, el apoyo recibido en diversos proyectos de carácter interno. Magdalena Alcayde efectuó la corrección de estilo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, D., y Lyle, M., 1984, Age of oceanic plates at subduction and volatile recycling. *Geophysics Research Letters*, 11, p. 951–954.
- Bebout, G., Ryan, J., Leeman, W., y Bebout, A. 1999, Fractionation of trace elements by subduction zone metamorphism--Effect of convergent-margin thermal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 171, p. 63–81.
- Bebout, G.E., 1995, The impact of subduction-zone metamorphism on mantle-ocean chemical cycling. *Chemical Geology*, 126, p. 191–218.
- Dill, H.G., 1998, Evolution of Sb mineralization in modern fold belts--Comparison of the Sb mineralization in the Central Andes (Bolivia) and the Western Carpathians (Slovakia). *Mineralium Deposita*, 33, p. 359-378.
- Fitz-Díaz, E., 2010, Progressive deformation, fluid flow and water-rock interaction in the Mexican Fold-Thrust Belt, Central Mexico. PhD thesis, Minesota University, 152 p.
- Guo, Q., 2008, Some aspects of arsenic and antimony geochemistry in high temperature granitic melt--Aqueous fluid system and in low temperature permeable reactive barrier--Groundwater system. PhD thesis, University of Waterloo.
- Laznicka, P., 1999, Quantitative relationships among giant deposits of metals. *Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 93, p. 455-473.
- Marcoux, E., Moelo, Y., Picot, P., y Baubron, J.C., 1988, Evolution minéralogique et isotopique (Pb) du filon sulfuré complexe des Borderies (Massif Central français) implications métalogéniques. *Mineralium Deposita*, 23, p. 58–70.
- Manýar, P.D., y Piccoli, P.M., 1989 Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, p. 635–643.
- Molina-García, R., y Urrutia-Fucugauchi, J., 1993, Deep crustal structure of central Mexico derived from interpretation of Bouguer gravity anomaly data. *Journal of Geodynamics*, 17, p. 181-201.
- Nieva, A.M.R., Andras, P., y Ramos, J.M.F., 2008, Antimony quartz and antimony-gold quartz veins from northern Portugal, 34, p. 533-546.
- Staudigel, H., y King, S., 1992, Ultrafast subduction: the key to slab recycling efficiency and mantle differentiation? *Earth Planet Scientific Letters*, 109, p. 517–530.
- White, D.E., y Guiza, R., 1949, Antimony deposits of Sonora district, Sonora, Mexico: U.S. Geological Survey Bulletin 962-B, p.119, 15 plates.
- White, D.E., y Guiza, R., 1945, Antimony deposits of the Tejocotes region, State of Oaxaca, Mexico: U.S. Geological Survey Bulletin 953-A, p.1-26, 8 plates.