

Especies sulfurosas del sistema hidrotermal actual del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán: distribución y comportamiento isotópico

Eduardo González-Partida

Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología,
Campus UNAM, Juriquilla, A.P. 1-742 Querétaro, Qro.
egp@conin.unicit.unam.mx

RESUMEN

En Los Azufres se muestra una mineralogía de sulfuros de cobre representados por idaita, digenita, covelita, bornita (que presentan una distribución puntual) y calcopirita. Por su parte, la pirita (especie más abundante), pirrotita y marcasita se presentan en zonas bien definidas.

La sucesión paragenética de los minerales opacos de neoformación está controlada en gran parte por un medio reductor a profundidad y la ebullición parece controlar la precipitación masiva de calcita y hematita, principalmente. La pirita se encuentra en un medio oxidante, asociado a una tasa de evaporación importante, y la marcasita está asociada a zonas de poca permeabilidad y pH ácido.

La ebullición (ampliamente documentada en el yacimiento) propicia una separación masiva de hidrógeno, así como de otros volátiles inicialmente disueltos en la fase líquida. El agua ascendente es más oxidante que la del reservorio profundo, y que la roca volcánica con la cual entra en contacto, fenómeno que se refleja en la evolución de las paragénesis minerales de pirrotita a pirita y a marcasita y pirita+hematita. Los ajustes termodinámicos implican un aumento en la fugacidad de oxígeno (fO_2) y una disminución simultánea de la fugacidad de hidrógeno (fH_2). El sistema hidrotermal de los Azufres es del tipo de "baja sulfidación".

La composición isotópica de la pirita presenta dos grupos: el primero (de las zonas más profundas del campo sin ebullición) con valores que van de $FeS_2 \delta^{34}S = -1.57\text{‰}$ a -2.97‰ , y un segundo (de las zonas más someras, a vapor dominante) con $FeS_2 \delta^{34}S = -4\text{‰}$ a -4.83‰ , el valor medio de la pirita es de $FeS_2 \delta^{34}S = -2.5\text{‰}$, que es muy similar al del H_2S centrado en $H_2S \delta^{34}S = -2.0\text{‰}$. La composición isotópica de los sulfatos acuosos es de $SO_4 \delta^{34}S = +21.47\text{‰}$, encontrándose en equilibrio con los sulfuros. La ebullición parece controlar la precipitación de sulfuros, así como su tendencia isotópica.

Palabras clave: minerales opacos, medio reductor, medio oxidante, ebullición, isótopos estables.

ABSTRACT

Los Azufres show a mineralogy of copper sulphides represented by idaite, digenite, covelite, bornite (which have a local distribution), and chalcopyrite. Pyrite (the most abundant species), pyrrhotite and marcasite are present in well-defined zones.

The paragenetic succession of neoforming opaque minerals is greatly controlled by a reductive medium found at great depth; boiling seems to control the massive precipitation of mainly calcite and hematite. Pyrite is found in an oxidant medium, associated to zones of low permeability and acid pH.

The boiling (amply testified in the beds) propitiates a massive separation of hydrogen and other volatile elements initially dissolved in the liquid phase. The ascending water is more oxidant than the one present in the deep reservoir and than the volcanic rock itself, with which it comes in contact, a phenomenon which is reflected in the evolution of the mineral paragenesis of pyrrhotite to

pyrite and to marcasite and pyrite+ hematite. The thermodynamic adjustments imply an increase in the fugacity of oxygen (fO_2) and a simultaneous lowering of the fugacity of hydrogen (fH_2). The hydrothermal system of Los Azufres belongs to "low sulphidation" type.

The isotopic composition of pyrite presents two groups: the first (from deep areas of the field, without boiling) has values that go from $FeS_2 \delta^{34}S = -1.57\text{‰}$ to -2.97‰ , and the second (from the more shallow, steam dominated zones) has values of $FeS_2 \delta^{34}S = -4\text{‰}$ to -4.83‰ . The mean value of pyrite is $FeS_2 \delta^{34}S = -2.5\text{‰}$, which is very similar to that of H_2S in $H_2S \delta^{34}S = -2.0\text{‰}$. The isotopic composition of the dissolved sulphates presents a composition of $SO_4 \delta^{34}S = +21.47\text{‰}$, which was found to be in isotopic equilibrium with sulphides. Boiling seems to control the precipitation of sulphides as well as its isotopic composition.

Keywords: sulphides, reductive medium, oxidizing medium, boiling, stable isotopes.

INTRODUCCIÓN

El campo geotérmico de Los Azufres fue descubierto en 1972 y se localiza en el estado de Michoacán, a 92 km al este de la ciudad de Morelia y a 30 km al NNW de Ciudad Hidalgo, que es el poblado más cercano e importante localmente. En este campo la CFE cuenta con una potencia instalada de 88 MW, explotando comercialmente un área de aproximadamente 35 km². Se tiene proyectado ampliar la capacidad de generación con la construcción próximamente de dos unidades de 20 MW cada una. Actualmente se tienen 67 pozos perforados de los cuales 37 son productores, 13 son fallidos, 8 en reparación, 6 inyectores, 1 en estudio y 2 son exploratorios. Cada pozo tiene una producción de vapor promedio de 39 t/h. Los Azufres es el primer campo geotérmico que genera electricidad a partir de fluidos saturados en roca volcánica y es el segundo en importancia en México, después de Cerro Prieto, B.C.

En el presente trabajo se presentan datos de minerales opacos, su distribución espacial y su comportamiento isotópico.

MARCO GEOLÓGICO

La sierra de Los Azufres ha sido estudiada regionalmente por Silva-Mora (1979), Demant (1981), Pradal y Robin (1985, 1986, y 1994), Garduño-Monroy (1988), Ferrari *et al.* (1991), Robin y Pradal (1993), y localmente por la CFE con los trabajos de Camacho y Palacios (1979), Aumento y Gutiérrez (1980), Dobson (1984), Dobson y Mahood (1985) y Pradal (1990); un esquema geológico se muestra en las Figuras 1 y 2. El basamento local está constituido por un paquete de derrames andesíticos con intercalaciones de paleosuelos, aglomerados y coladas basálticas; le sobryace discordantemente un ciclo volcánico de composición ácida (Riolita Agua Fría) y depósitos lacustres: La Dacita San Andrés representa una fase volcánica importante y es seguida de depósitos ignimbríficos e inyecciones riolíticas (Riolita Yerbabuena), que forman estructuras dómicas. La última etapa

volcánica en la región es de composición básica, con afloramientos de derrames al este y oeste del campo y cineritas en los alrededores. La geoquímica de roca total realizada en las diferentes unidades litoestratigráficas manifiesta una tendencia calcialcalina (Cathelineau *et al.*, 1987). Los estudios estructurales de Garduño-Monroy (1988), y Ferrari *et al.* (1991) demuestran dos sistemas principales de fallas de inclinación casi vertical, el mayor tiene una dirección E-W y corta a otros de menor importancia y más antiguos de dirección NE 22°-44° SW. Las características de estas fallas son la causa de la porosidad secundaria. Las fallas E-W presentan desplazamiento lateral y se relacionan con el sistema regional activo Acambay, e intersectan el borde sur de la caldera de Los Azufres.

MINERALOGÍA DE MINERALES OPACOS DE NEOFORMACIÓN

Los métodos de muestreo, métodos analíticos para el estudio de los sulfuros y análisis isotópico, así como resultados preliminares se presentan ampliamente discutidos en González-Partida (1981, 1985), Arnold y González-Partida (1988), González-Partida *et al.* (1988a, b, 1989a, b, c, 1990 y 1992)

En Los Azufres, estudios detallados (cada 10 m en los diferentes pozos) de minerales opacos, muestran una mineralogía de sulfuros de cobre representados por idaita, digenita, covelita y bornita, presentando una distribución puntual en el yacimiento, y calcopirita (más abundante). Su comportamiento en el campo geotérmico se muestra en la Figura 3, donde la bornita y covelita aparecen a 3,500 m, 2,500 m y 1,500 m de profundidad en la zona Norte de campo y sólo la calcopirita tiene una distribución general, incrementándose su abundancia a mayores profundidades. Estos minerales están asociados a la pirita. La idaita se presenta independientemente, mientras que la digenita reemplaza a la bornita en asociación con la calcopirita. Por su parte, la pirita, pirrotita y marcasita se presentan en zonas bien definidas, como se muestra en la Figura 4.

Comportamiento isotópico de las especies sulfurosas

De los 40 análisis isotópicos practicados por González-Partida (1985) y Arnold y González-Partida (1988), 35 corresponden a piritas de diferentes pozos, 4 a H₂S y una muestra a SO₄. Según estos autores, la composición isotópica de la pirita presenta dos grupos; el primero (de las zonas más profundas del campo) con valores que van de FeS₂ δ³⁴S = -1.57‰ a -2.97‰ y un segundo (de las zonas más someras, a vapor dominante) con FeS₂ δ³⁴S = -4‰ a -4.83‰, con un valor medio de FeS₂ δ³⁴S de -2.5‰, que es muy similar al del H₂S cen-

trado en H₂S δ³⁴S = -2.0‰. La composición isotópica de los sulfatos acuosos presentaron un comportamiento de SO₄ δ³⁴S = +21.47‰.

Por otro lado, la fase líquida del yacimiento presenta un comportamiento isotópico similar, ya que de acuerdo a los resultados de Nieva-Gómez *et al.* (1987a) en el oxígeno se midió mayor abundancia de isótopos pesados en las partes más profundas y un mayor predominio de isótopos ligeros en los niveles más someros, así por ejemplo en el pozo A-9 (a los 945 msnm) el δ¹⁸O = -2.4‰ y para el pozo A-6 (a 2,015 msnm), el δ¹⁸O = -5.54‰ (para los valores extremos encontrados).

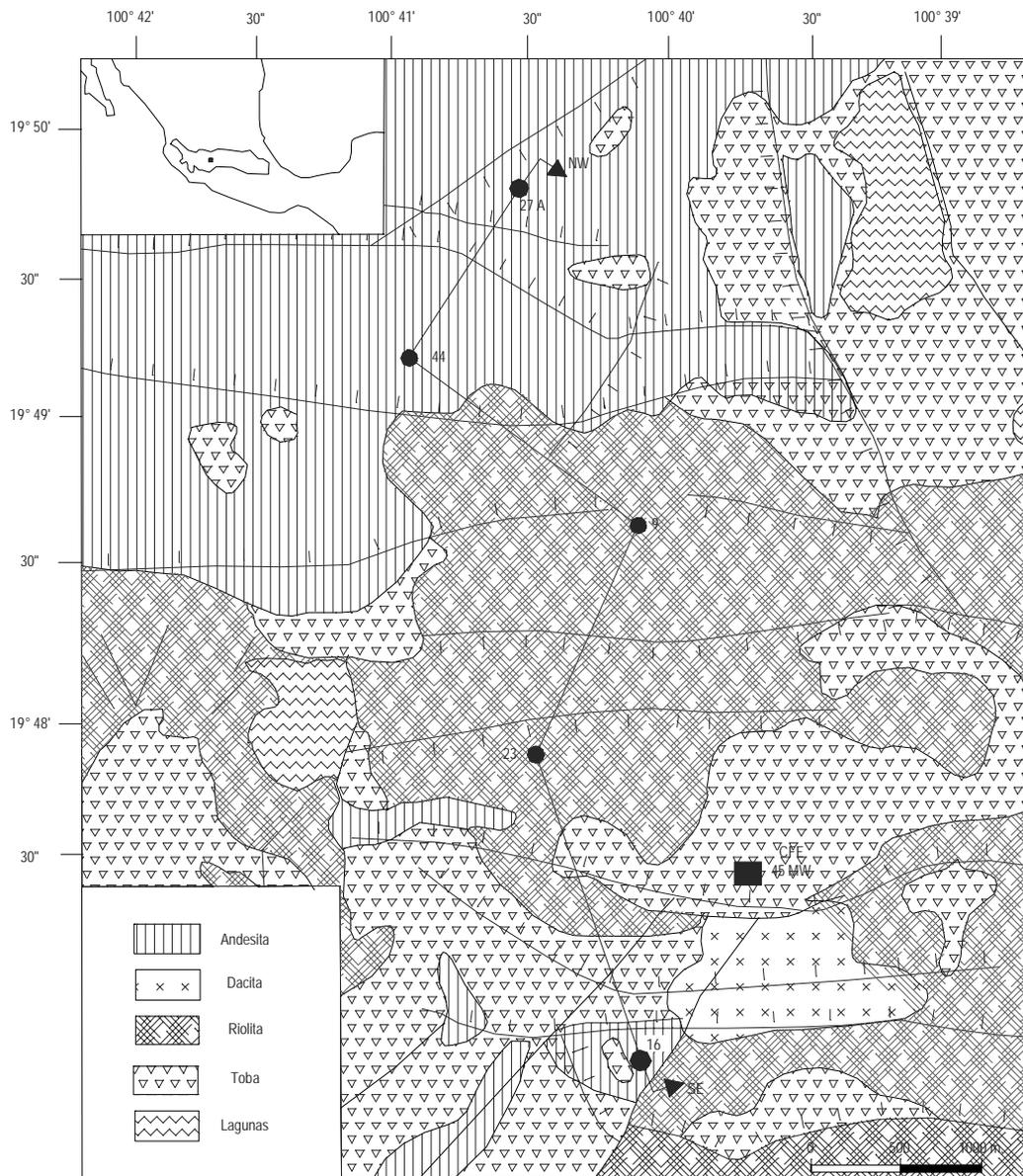


Figura 1.— Mapa geológico-estructural del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Se indica la posición de los pozos.

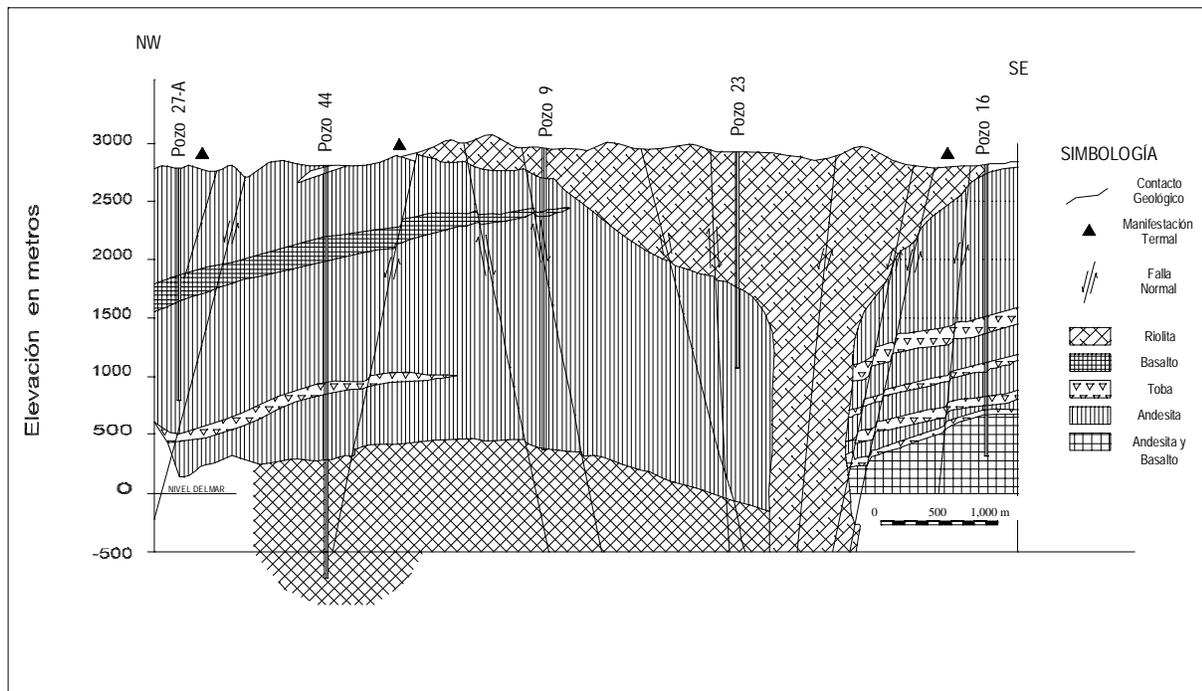


Figura 2.- Sección geológico-estructural del campo geotérmico de Los Azufres en donde se muestra la localización de los pozos.

DISCUSIÓN

La distribución en el campo de la pirrotita, pirita y marcasita es de fundamental importancia debido a que la marcasita se forma por precipitación directa a partir del fluido hidrotermal y se restringe a las riolitas impermeables del campo (domos colada como se muestra en la Figura 2); por otro lado, se ha demostrado en estudios de laboratorio (Marowchick y Barnes 1986) que el pH ácido y un medio poco permeable son parámetros favorables para su precipitación. La pirrotita hexagonal observada a profundidad es indicadora de un medio reductor; a las profundidades a las que se le observó, las temperaturas determinadas en inclusiones fluidas van de 300 a 320°C (González-Partida *et al. op cit.*), aunque de acuerdo con Vaughan y Craig (1997) su forma hexagonal es independiente de la temperatura, ya que puede formarse desde los 50°C a más de 350°C.

En Los Azufres, el depósito se conoce a profundidades de 3,500 m (pozo Az-44); la roca encajonante de los fluidos es principalmente andesítica, la alteración hidrotermal profunda es de carácter propilítico y presenta características de un yacimiento de baja sulfidación, ya que los fluidos iniciales (protofluido) son neutros y de baja salinidad. El yacimiento es de alta entalpía con temperaturas del orden de los 330°C y presiones de 170 a 180 bares a fondo de yacimiento (González-Partida *op. cit.*). Los elementos metálicos observados son Cu y Fe, las especies cupríferas, con excepción de la calcopirita,

están en forma puntual, no siendo así para la pirita y hematita que se llegan a concentrar hasta en un 1 a 2% de la roca total. En los yacimientos geotérmicos, los metales más comunes son As, Sb, Ag, Au, Hg, Cu, Pb, Zn, Mn y Fe (Weissberg *et al.* 1979). En Cerro Prieto, Mercado (1967) reporta la presencia de Pb, Zn y Au, (aquí el yacimiento se encuentra alojado en lutitas y areniscas). Según Hedenquist y Lowenstern (1994), el Cu y Au en los yacimientos de alta sulfidación (pórfidos de cobre y oro) son transportados por salmueras concentradas; según ellos, el Cu, en los de baja sulfidación, no se concentra en grandes cantidades, debido a la baja salinidad, lo que no permite un mecanismo de transporte eficiente. En los yacimientos de baja sulfidación la fuente de los elementos es multicomponente por instalarse en niveles someros de la corteza y la roca encajonante puede tener influencia (*herencia metálica*) en su origen. Por lo general, las andesitas contienen una cierta cantidad de cobre, y los minerales que se observan en el yacimiento pudieran tener aquí su origen. Su distribución espacial en el yacimiento es el reflejo de la evolución físicoquímica que se da a lo largo de 3,500 m de reservorio conocido.

Los depósitos minerales siempre reflejan el carácter de los fluidos de los que provienen, la paragénesis mineral discutida y que se presenta en la Figura 5, reflejan una acidificación del medio. La ebullición propicia una separación masiva de hidrógeno, así como de otros volátiles inicialmente disueltos en la fase líquida.

De acuerdo con Arnold y González-Partida (1987),

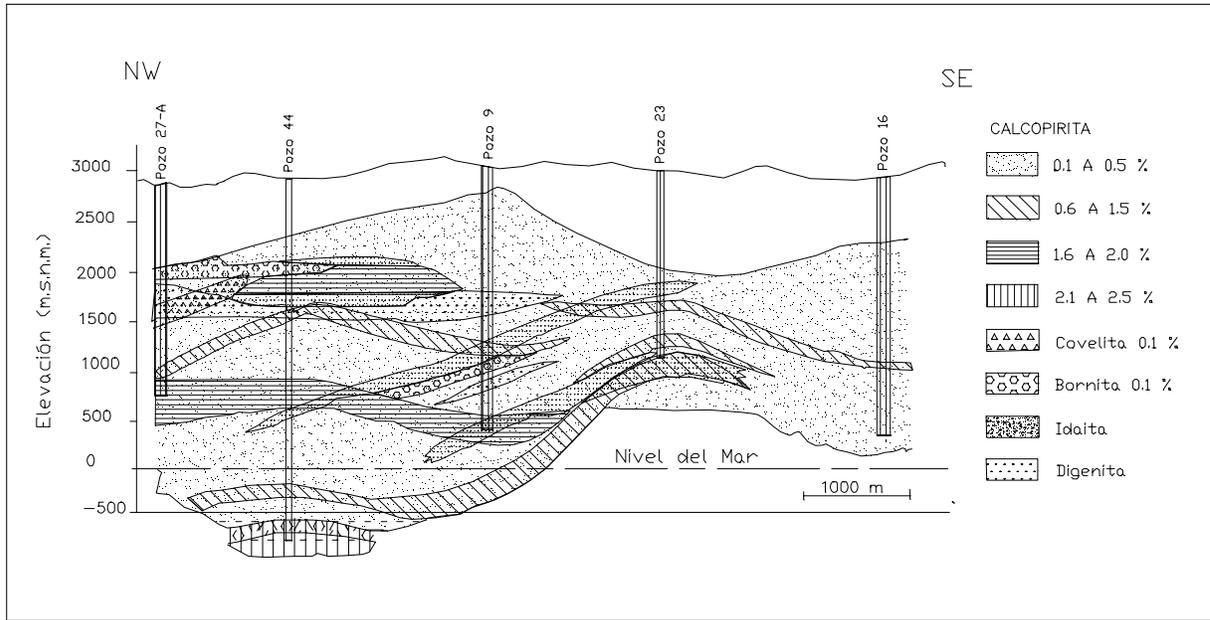


Figura 3.- Distribución en ‰ (partes por mil) de los minerales cupríferos observados en una sección NW-SE del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. La idaita y digenita se presentan de manera puntual.

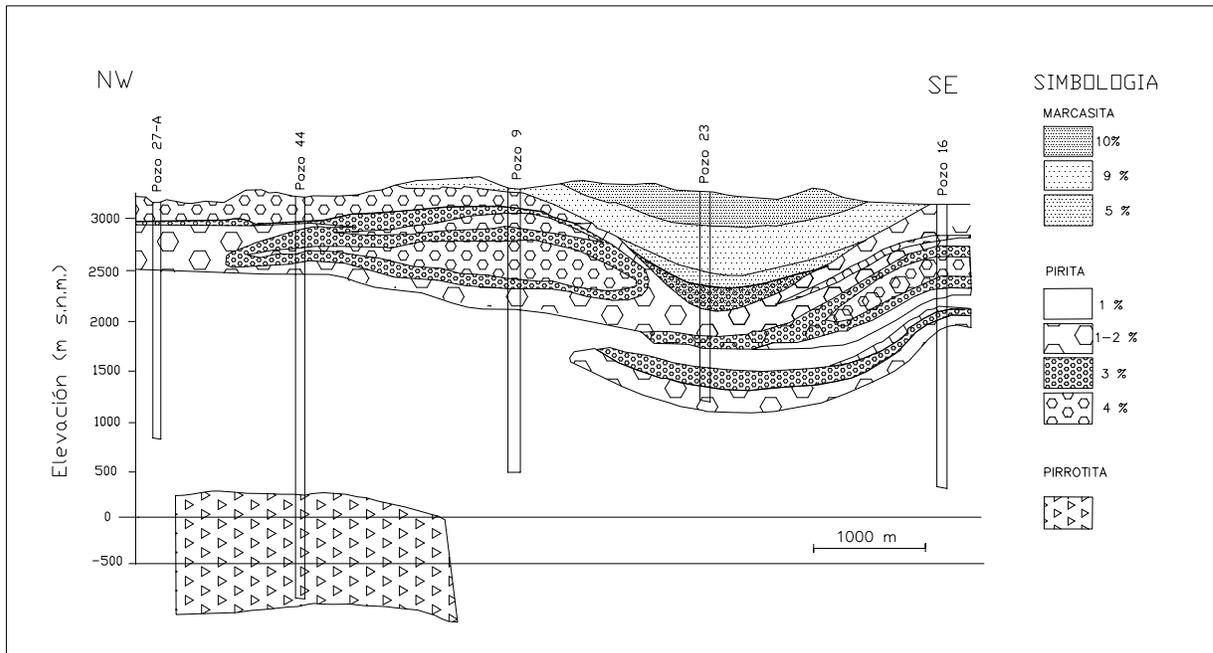


Figura 4.- Distribución en ‰ (partes por mil) de los minerales: pirrotita, pirita y marcasita.

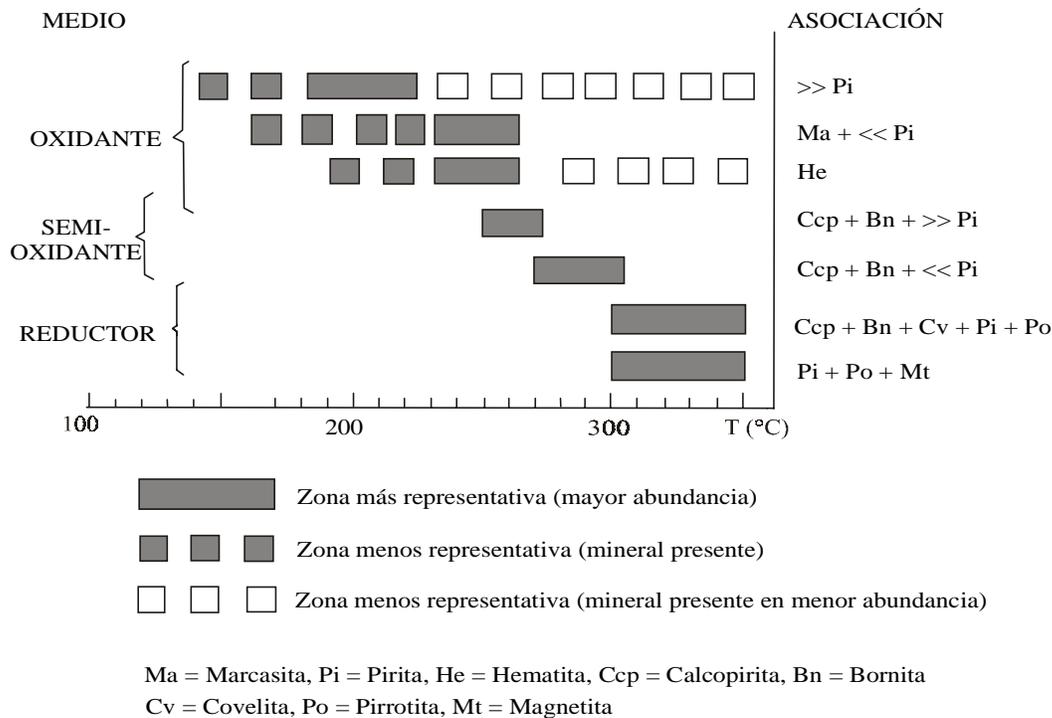
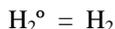
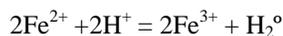


Figura 5.- Zonación paragenética de los minerales opacos de neoformación del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Las temperaturas que se grafican corresponden a las determinadas por medio del estudio de inclusiones fluidas por González-Partida (1999a).

el desplazamiento del equilibrio.

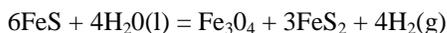


implica un desplazamiento paralelo del equilibrio de oxidación a cinética rápida de:



y un aumento en la relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ del líquido. El agua es más oxidante que la del reservorio profundo. Este fenómeno se refleja en la evolución de las paragénesis minerales de pirrotita a pirita, a marcasita y pirita + hematita. Los ajustes termodinámicos implican un aumento en la fugacidad de oxígeno ($f\text{O}_2$) y una disminución simultánea de la fugacidad de hidrógeno ($f\text{H}_2$).

Este efecto es tributario, según Arnold y González-Partida (1987), de una reacción entre fases fluidas y cristalizadas:



El fluido ascendente debe ser más oxidante que la roca volcánica con la cual entra en contacto. Por otro lado, los elementos metálicos se acomplejan con cloruros, su depositación es el resultado de un decremento en las concentraciones de los volátiles debido a la ebullición,

meccanismo eficiente para el depósito de minerales.

De acuerdo al estado *redox* del azufre, Hedenquist (1987) propuso los términos de *baja sulfidación* y *alta sulfidación*. Según este autor, el azufre en los sistemas geotérmicos con valores de pH próximo a la neutralidad está en su estado *redox* más bajo (S^{2-}) con la presencia de H_2S (a lo que llamó de baja sulfidación). En Los Azufres, el fluido primario clorurado-sódico profundo desarrolla una alteración hidrotermal propilítica con pH neutro a alcalino y coincide con las características que definen un sistema hidrotermal de baja sulfidación.

El sistema sulfatos-sulfuros, acuoso y cristalizado, desempeña un papel muy importante en geoquímica y metalogénica. Se sabe con precisión que, en comparación con los sulfuros fácilmente oxidables, los sulfatos son difíciles de reducir (González-Partida 1981, 1985; Arnold y González-Partida 1987). Esta dualidad de comportamiento es explicable, pues, bajo la forma oxidada (S^{6+}), el azufre está sólidamente unido a cuatro oxígenos por medio de dos uniones covalentes, cuya ruptura requiere de una energía alta, mientras que bajo la forma reducida (S^{2-}) el azufre está ligado con dos uniones iónicas de baja energía. La reducción reversible de sulfatos a sulfuros a una temperatura mayor a los 300°C está ampliamente documentada en la literatura (ver Arnold y González-Partida 1988). Por otro lado, Ohmoto y Lasaga (1982) consideran que el sistema sulfato-sulfuro es

aún irreversible a los 200°C, si el pH es ácido y existe una concentración elevada del azufre en solución. En el sistema geotérmico de Los Azufres, a la temperatura de los 330°C, el pH es neutro y la molaridad total de azufre es baja (Arnold y González Partida 1988). Estos autores encontraron que la composición de la fuente del azufre actual es de $\delta^{34}\text{S} = -2.34\text{‰}$ en promedio y el valor que calcularon para los sulfatos fue de $\text{SO}_4\delta^{34}\text{S} = +20.1\text{‰}$, el cual es muy próximo al valor medido de $\text{SO}_4\delta^{34}\text{S} = +21.47\text{‰}$, demostrándose el equilibrio químico e isotópico en el sistema hidrotermal, por lo cual la distribución de las especies sulfurosas tienen un significado en términos de evolución hidrodinámica en el yacimiento actual de Los Azufres.

En teoría, los isótopos estables tienen una fuerte dependencia a fraccionarse con la temperatura; por otro lado, se sabe que la ebullición ejerce igualmente esta influencia en el fraccionamiento isotópico. En el yacimiento de Los Azufres, tanto para el azufre como para el oxígeno del agua del sistema hidrotermal, los valores isotópicos más negativos se encuentran hacia los niveles más someros y descargas hidrotermales, donde la fase vapor predomina.

CONCLUSIONES

En Los Azufres, se muestra una mineralogía de sulfuros de cobre representados por idaita, digenita, covelita, bornita y calcopirita (más abundante). Por su parte la pirita, pirrotita y marcasita se distribuyen en zonas bien definidas. El Cu puede provenir de las andesitas, roca encajonante del reservorio. En el sistema hidrotermal de los Azufres se da un medio de "baja sulfidación"

La composición isotópica de la pirita presenta dos grupos: el primero (en las zonas más profundas del campo) con valores que van de $\text{FeS}_2\delta^{34} = -1.57\text{‰}$ a -2.97‰ y un segundo (de las zonas más someras, a vapor dominante) con $\text{FeS}_2\delta^{34} = -4\text{‰}$ a -4.83‰ , y con un valor medio de $\text{FeS}_2\delta^{34} = -2.5\text{‰}$, que es muy similar al del H_2S centrado en $\text{H}_2\text{S}\delta^{34} = -2.0\text{‰}$. La composición isotópica de los sulfatos acuosos presentaron una composición de $\text{SO}_4\delta^{34} = +21.47\text{‰}$, encontrándose en equilibrio químico e isotópico a las temperaturas de fondo del yacimiento ($T \cong 330^\circ\text{C}$). La ebullición parece controlar la precipitación de sulfuros, así como su variación isotópica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece particularmente a Mireya Maples y Sara Solis por la elaboración de las figuras y el *abstract*. A Luca Ferrari y árbitros anónimos por su colaboración en la revisión final del manuscrito, y sus atinadas observaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, M., y González-Partida, E., 1987, Le système hydrothermal actuel de Los Humeros (Mexique): Etat du système $\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{S}$ á 300°C, origine du soufre et phénomènes de oxydation associés á la ebullición du fluide ascendant: Mineralium Deposita, v. 22, p. 90-98.
- Arnold, M., y González-Partida, E., 1988, Equilibrio químico e isotópico entre sulfatos y sulfuros de los fluidos hidrotermales del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. Implicaciones sobre el origen del Azufre: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 7, núm. 1, p. 97-105.
- Aumento, F., y Gutiérrez, A., 1980, Geocronología de Los Azufres Michoacán: Comisión Federal de Electricidad, reporte interno 3-80, 66p.
- Camacho, F., y Palacios, N.M., 1979, Geología de la zona geotérmica de Los Azufres Michoacán: Comisión Federal de Electricidad, reporte interno 6-79, 42 p.
- Cathelineau, M., Oliver-Hernández, R., y Nieva-Gómez, D., 1987, Geochemistry of volcanic series of the Los Azufres geothermal field (México): Geofísica Internacional, v.26., p. 273-290.
- De la Cruz V., Aguilar J., Ortega D., Sandoval J., 1982, Estudio geológico-estructural a detalle del campo geotérmico Los Azufres Michoacán: Reporte Interno de la CFE, # 9-82, 38 p.
- Demant, A., 1981, Le axe Néovolcanique Mexicain; étude volcanologique et pétrographique—signification géodynamique: Thèse du doctorat de Etat, Université de Aix-Marseille, 259 p.
- Dobson, P., 1984, Volcanic stratigraphy and geochemistry of the Los Azufres: M. Sc. Tesis, Stanford Univ., p 1- 59.
- Dobson, P., y Mahood, G. A., 1985, Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico: J. Volcanol. Geotherm. Res. v. 25, p. 273-287.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquaré, G., y Tibaldi, A., 1991, Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relationships with regional tectonics: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 47, p. 129-148.
- Garduño-Monyoy V., 1988, La Caldera de Los Azufres y su relación con el sistema regional E-W: Geotermia Revista Mexicana de Geología, v.4, p. 49-61.
- González-Partida, E., 1981, La Province filonienne Au-Ag de Taxco-Guanajuato (Mexique): Thèse de Docteur-Ingenieur. CRPG-ENSG, Institute National Polytechnique de Lorraine, 234 p.
- González-Partida, E., 1985, Estudio metalogénico de la parte centro-occidental de México: Tesis de Doctorado de Estado. INPL-Escuela de Geología: Nancy, Francia, 370 p. (Inédita).
- González-Partida, E., Barragán-R., R., y Nieva-G., D., 1988a, Las inclusiones fluidas en Geotermia; una herramienta de la petrología experimental aplicada al pozo Az-44: Geotermia, Revista Mexicana de Geología, v.4, p. 1-14.
- González-Partida, E., Barragán-R., R., y Nieva-G., D., 1988b, Estudio de los Minerales Opacos en una sección N-S del Campo Geotérmico de Los Azufres Mich.: Geotermia, Revista Mexicana de Geología, v., 4-3., p. 107-122.
- González-Partida, E., Barragán-R., R., y Nieva-G., D., 1989a, Estudio Detallado de las inclusiones fluidas en el Sistema hidrotermal activo, del Campo Geotérmico de Los Azufres Mich.: Geotermia Revista Mexicana de Geología, v. 5-1, p. 126-152.
- González-Partida, E., Barragán-R., R., y Nieva-G., D., 1989b, El Sistema Cu-Fe-S, en el Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.: Geotermia, Revista Mexicana de Geología, v. 5-1., p. 107-125.
- González-Partida, E., Torres-R., V., y Nieva-G., D., 1989c, Caracterización mineralógica en 10 Pozos del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.: Geotermia, Revista Mexicana de Geología, v. 6-1., p. 347-374.
- González-Partida, E., Torres-R., V., y Nieva-G., D., 1990, Petrografía

- y metamorfismo hidrotermal del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.—comportamiento en función del metamorfismo: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 6-1, p. 43-92.
- González-Partida, E., Torres-R., V., Nieva-G., D., y Quijano, L., 1992, Comportamiento de las especies sulfuradas de 4 pozos del Campo Geotérmico de los Humeros, Pue.: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v.8-1, p. 67-80.
- González-Partida, E., 1999a, Comportamiento de fluidos en un sistema hidrotermal actual: caso de Los Azufres, Mich.: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (en revisión)*.
- González-Partida E., 1999b, Evidencias de evolución de un fluido básico a ácido a partir del análisis de la alteración hidrotermal del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (en prensa)*.
- Hedenquist, J. W., 1987, Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the circum Pacific Basin, *in* Horn, M.K., ed., *Transactions of the Fourth Circum Pacific Energy and Mineral Resources Conference*, Singapore, American Association of Petroleum Geologists, p. 513-524.
- Hedenquist, W. J., y Lowenstern, B.J., 1994, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits: *Nature*, v. 370, p 519-527.
- Marowchick, J.B. y Barnes, H., 1986, Marcasite precipitation from hydrothermal solution: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 50, p. 2,615-2,629.
- Mercado, S., 1967, *Geoquímica hidrotermal en Cerro Prieto, B.C., México: Comisión Federal de Electricidad, Informe Inédito*. 30 p.
- Nieva-Gómez, D., Barragán-Reyes, R., Cathelineau, M., González-Partida, E., Oliver-Hernandez, R., y Verma-Pal, M., 1987, Estudio de la estructura hidrológica y de la distribución de parámetros físico-químicos del yacimiento de Los Azufres: Informe final, Comisión Federal de Electricidad, p. 1-356.
- Nieva-Gómez, D., Verma-Pal, M., Santoyo-Gutiérrez, E., Barragán Reyes, R., y Portugal-Marin E., 1987, Estructura hidrológica del yacimiento de Los Azufres, Mich: Simposio Internacional Sobre Desarrollo y Explotación de Recursos Geotérmicos. IIE- CCE, Memorias V 1 p 202-213.
- Ohmoto, H., Lasaga, A., 1982, Kinetics of reactions between aqueous sulfates and sulfures in hydrothermal systems: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 46, p. 1,727-1,746.
- Pradal, E., 1990, La caldera de Los Azufres (Mexico)—Contexte volcanologique de un grand champ géothermique : Thèse Doctorat, Univ. Clermont-Ferrand, 250 p. (Inédita).
- Pradal, E. y Robin, C., 1985, Découvert d une caldéra majeure associée au champ géothermique Los Azufres Mich.: *C. R. Acad. Scs. Paris*, T. 301, Série II. N. 14., p.2069-2074.
- Pradal, E. y Robin, C., 1986, Major caldera structure at the origin of the Los Azufres geothermal center (Mexico): *Int. Volcanol. Cong., Auckland, New Zealand, Abstr.* pp 68.
- Pradal, E. y Robin, C., 1994, Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 63., p. 201-215.
- Robin, C., y Pradal, E., 1993, The Los Azufres caldera, Mexico—Comment on the paper by Ferrari *et al.* or —An attempt to understand the volcanic structure—: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 56., p. 339-344.
- Silva-Mora L., 1979, Contribution a la connaissance de l'Axe volcanique Transmexican: étude géologique et pétrologie des lavas du Michoacán oriental: Thèse du troisième cycle, Univ. De Aix-Marseille III, 146 p. (Inédita).
- Vaughan D., J., Craig J., R., 1997, Sulfide ore mineral stabilities, morphologies, and intergrowth textures, *in* Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits: New York, Wiley Intersciences, Third Edition*, p. 367-434
- Weissberg, G.B., Browne, R.L.P., y Seward, T.M., 1979, Ore metals in active geothermal systems, *in* Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits: New York, Wiley Intersciences, Second Edition*, p. 738-780.
- Manuscrito recibido: Abril 22, 1999
 Manuscrito corregido recibido: Septiembre 5, 1999
 Manuscrito aceptado: Febrero 9, 2000