



## **VARIABILIDAD DE LA SALINIDAD EN INCLUSIONES FLUIDAS DEL PÓRFIDO AURÍFERO MARTE. EVIDENCIAS DE UN PROCESO CONTINUO DE FRACTURAMIENTO Y APERTURA DE VETILLAS DURANTE LA FORMACIÓN DEL STOCKWORK.**

**Eduardo Campos Sepulveda\***

### **RESUMEN**

Se presentan resultados preliminares de un estudio destinado a caracterizar las inclusiones fluidas y las condiciones de presión, temperatura y salinidad de los fluidos relacionados con los eventos generadores de vetillas de cuarzo en el yacimiento Marte.

### **GEOLOGÍA LOCAL**

El pórfido aurífero Marte (Vila y otros 1991) se ubica en la Cordillera de los Andes, de la III Región de Atacama, Chile, a unos 130 km al este de la ciudad de Copiapó. Sus coordenadas geográficas son 27°10'19" latitud sur y 69°01'12" longitud oeste, y su altura es de 4.200 ms.n.m (Fig. 1).

El yacimiento se emplaza en un arco volcano-plutónico de edad Mioceno Medio a Superior. Las rocas volcánicas corresponden a lavas andesíticas pobres en fenocristales sin rasgos de alteración, y que son el remanente de erosión de una unidad más extensa, en la cual se han definido manteos de 25° al noreste. El cuerpo mineralizado por su parte corresponde a un stock diorítico de hornblenda-biotita (Vila y otros 1991).

El emplazamiento del stock diorítico ocurrió sincrónico a la formación del estrato-volcán hace unos 13 ó 14 MA (Sillitoe y otros 1991), y se ha subdividido en tres unidades: pórfido diorítico de grano grueso que corresponde al de mayor distribución en el yacimiento; pórfido diorítico de grano fino, de distribución más restringida, que aumenta su volumen en profundidad, donde corta a la diorita de grano grueso; y finalmente una unidad de microdiorita que corta a los pórfidos antes mencionados, especialmente la variedad de grano fino. La microdiorita a su vez es cortada localmente por una brecha hidrotermal, con la cual está estrechamente relacionada (Vila y otros 1991). La mayor parte de la microdiorita puede ser designada como brecha de intrusión, debido a la abundancia de xenolitos de pórfido diorítico presentes en su matriz (Sillitoe, 1985).

Las estructuras de mayor importancia en el yacimiento corresponden a una falla normal de rumbo NNE-SSW con manteo de 50°E presente en la vecindad del pit, una falla de rumbo NW-SE definida al este del pit, y un lineamiento detectado en imagen satelital de rumbo noreste. El yacimiento se localiza en la intersección de estas tres estructuras (Vila y otros 1991).

Una zona extensional de rumbo N40°-60°W de gran ángulo habría controlado y determinado la orientación y actitud dominante del vetilleo tipo "stockwork" en el depósito (Vila y otros 1991).

### **METODOLOGIA**

El estudio se realizó en inclusiones fluidas hospedadas en cristales de cuarzo. Las muestras analizadas se recolectaron a distinta profundidad en el sondaje de diamantina DDH-02 ( J18=4.172, J22=4.152, J26=4.143, J27=4.118, J34=4.012, J35=4.009 ms.n.m). El criterio aplicado para la selección las muestras fue la ocurrencia de vetillas de cuarzo claramente definidas, que permitieron establecer la cronología relativa de eventos de atrapamiento de fluidos y asegurar una cobertura espacial y paragenética del sistema.

Econ. Geol., v. 80, p. 1467-1514.

\* Depto Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción. Casilla 3-C. Concepción. Chile.

Las mediciones se llevaron a cabo en el laboratorio de microtermometría del Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, y consideraron la determinación de temperaturas de homogeneización, fusión del hielo y fusión del cristal de halita, cuando fue necesario; para ello se trabajó con una platina Linkam modelo THMSG-600, montada sobre un microscopio Nikon Optiphot-Pol, de doble óptica, dotado con un objetivo de larga distancia de trabajo Nikon Plan, de 40 aumentos.

### **CARACTERIZACION DE INCLUSIONES FLUIDAS**

Las inclusiones fluidas de mina Marte presentan como característica importante un reducido tamaño. En general las inclusiones estudiadas estaban comprendidas entre 3 a 80 $\mu$ , con muchas de ellas con diámetro menores a 20 $\mu$ . Este factor constituye la principal limitante del presente trabajo ya que si bien en todas las muestras analizadas se observó abundantes inclusiones, sólo en unas pocas se pudieron realizar mediciones microtermométricas, (el tamaño mínimo óptimo para determinar temperaturas de homogeneización fue de 3 $\mu$ , mientras que los procedimientos de congelamiento se limitaron a inclusiones mayores a 10 $\mu$ ).

El escaso desarrollo de zonas de crecimiento complicó la clasificación de las inclusiones según el criterio de Roedder (1984), basado en el carácter de las inclusiones, sean estas primarias, secundarias o pseudosecundarias. Las inclusiones primarias ocurren relativamente aisladas y no muestran una distribución planar. Tienden a presentar bordes regulares con formas redondeadas, ovaladas o de cristales negativos. Las inclusiones secundarias y pseudosecundarias son generalmente de mayor tamaño, con formas elongadas y bordes irregulares, se presentan agrupadas conformando estructuras planares dentro de los cristales huespedes.

La clasificación de los distintos tipos de inclusiones fluidas se basó en el número de fases y composición de estas a temperatura ambiente (Roedder, 1984). En el total de inclusiones fluidas observadas, se reconoció la existencia de tres fases presentes a temperatura ambiente: fase líquida esencialmente agua, fase gaseosa representada por una burbuja y fase sólida correspondiente a un cristal de halita. Estas fases se combinan en distintas proporciones pudiendo estar ausentes algunas de ellas; de esta forma fue posible diferenciar cinco tipos de inclusiones:

- Monofásicas llenas de vapor (V); corresponde al tipo de inclusión más abundante en las muestras estudiadas.
- Monofásicas llenas de líquido (L), estas presentan claras evidencias de haber sido originadas por estrangulamiento.
- Bifásicas ricas en líquido (L+V); la burbuja ocupa aproximadamente entre un 2 y 15% en volumen, y representa el 80% de las inclusiones medidas.
- Bifásicas ricas en gas (V+L), en éstas la burbuja representa entre un 5 y 30% en volumen de la inclusión.
- Trifásica, líquido-vapor-halita (L+V+S), generalmente son ricas en líquido, con una burbuja que representa entre un 20 y 40 % del volumen total de la inclusión. Éstas resultan ser las inclusiones menos abundantes observadas en las muestras analizadas.

### **TEMPERATURA DE HOMOGENEIZACIÓN (Th).**

Los valores de homogeneización determinados, presentan un amplio rango de temperaturas, comprendido entre los 190° y 430°C, con una media de 290°C (Fig. 2). Se reconocieron dos tipos de comportamiento durante los procesos de calentamiento: homogeneización a la fase líquida, por desaparición de la burbuja, y homogeneización a la fase vapor, por desaparición de la fase líquida. El mayor número de inclusiones homogeneizó a la fase líquida.

Algunas inclusiones decrepitaron durante el proceso de calentamiento antes de ocurrida la homogeneización, particularmente aquellas ricas en gas. En estos casos la temperatura de decrepitación se consideró como un valor de Th mínimo.

La distribución de las temperaturas en cada muestra individual poseen medias que van desde 261°C (muestra J27) a 320°C (muestra J35) (Fig. 3). Esta variabilidad depende, esencialmente, del número de datos de temperatura medidos en cada muestra. Este factor es controlado por muchos parámetros, siendo quizás el más importante la naturaleza medible relativa de las inclusiones, la cual depende del tamaño, forma, razones volumétricas de fases líquido a vapor, densidad de las inclusiones en cualquier área particular. Por lo anterior, resulta evidente que entre las distintas muestras analizadas, existe una escasa variabilidad, que es

independiente de la profundidad a la cual fueron tomadas las muestras y acusa una clara estabilidad en la temperatura de los fluidos que, originaron las distintas vetillas de cuarzo estudiadas.

## **SALINIDAD**

La salinidad de las inclusiones fluidas bifásicas fue calculada a partir del punto final de congelamiento ( $T_m$ ), utilizando el método de Potter y otros (1978) y se presenta como % en peso de NaCl equivalentes (Shepperd y Rankin, 1995). La determinación de  $T_m$  resultó sumamente complicada debido al reducido tamaño de las inclusiones. Sin embargo, se lograron congelamientos exitosos en 53 inclusiones, lo que permitió establecer valores de  $T_m$  dentro de un rango variable de  $-0,5^\circ\text{C}$  y  $-21,5^\circ\text{C}$ . Aún cuando todas las inclusiones fueron congeladas a temperaturas inferiores a  $-100^\circ\text{C}$ , no se observaron cambios de fase hasta las primeras evidencias de fusión del hielo  $T_m(\text{inicial})$  a temperaturas menores a  $-21,8^\circ\text{C}$ . Este punto eutéctico sugiere, pero no confirma, la predominancia de NaCl y la ausencia de sales divalentes en la fase líquida, y el sistema podría corresponder aproximadamente a NaCl-H<sub>2</sub>O (Stuart, 1991). Además, en las inclusiones que presentan salinidades bajas (2,5% en peso de NaCl equivalentes) se determinaron temperaturas de eutécticos indicativos del sistema NaCl-H<sub>2</sub>O (Grant, 1988), por lo que los valores determinados de  $T_m$  serían equivalentes a salinidades entre 0,9 y 23,5 % en peso de NaCl equivalentes.

En las inclusiones trifásicas, se identificó la existencia de halita por su transparencia y por presentarse en cristales de hábito cúbico. En general los cristales de halita ocupan entre 10 y 15 % del volumen de la inclusión. Las salinidades determinadas para estas inclusiones (15 datos en total), se determinaron al calentarlas hasta la desaparición del cristal de halita, lo que permitió determinar salinidades para inclusiones trifásicas entre 30,2 y 39 % en peso de NaCl equivalentes (Keevil, 1942).

Por todo lo anterior, claramente se deduce que existe un amplio rango de variación de los valores de salinidad entre las distintas vetillas analizadas, incluso dentro de una misma muestra. Por ejemplo, en las muestras J22 y J34 se determinaron valores de salinidad altos y bajos dentro de un rango estrecho (0,9 a 6,4 y 32 a 33,6 % en peso de NaCl equivalentes respectivamente) (Fig.4), mientras que en la J35 se observa un rango de salinidad extremadamente amplio (0,9 a 39 % en peso de NaCl equiv.). Algo similar, aunque en un rango más restringido, ocurre en las muestras J18 y J27 (Fig. 4).

## **PRESIÓN**

La coexistencia de inclusiones ricas en líquido y ricas en gas, es una importante evidencia que indica la presencia de dos fases inmiscibles, vapor y líquido, producto de la ebullición en el momento de la formación de la inclusión. La ausencia de inclusiones monofásicas líquidas en las cercanías de las ricas en vapor, apoya la idea de que estas inclusiones representan en sí el atrapamiento de una fase vapor y no son el resultado de estrangulamiento (Bodnar y otros, 1985). Debido a las claras evidencias de ebullición observadas, se presume que la presión de vapor de los fluidos se acerca estrechamente a la presión total durante las distintas etapas de la formación de las vetillas.

Si tenemos que los valores medios de temperaturas de homogeneización y salinidad en inclusiones trifásicas y bifásicas, son  $304^\circ$  y  $264^\circ\text{C}$  y 33% y 2,6 % en peso de NaCl equiv. respectivamente. Asumiendo que los fluidos consisten únicamente en H<sub>2</sub>O-NaCl y se encuentran en ebullición, entonces las presiones asociadas a esos valores de  $T_h$  y salinidad según Haas (1976) serán de 67 y 50 bars respectivamente.

El desarrollo de cristales euhedrales de cuarzo sugiere un crecimiento en espacios abiertos y constituye una clara evidencia de que fluidos fueron atrapados bajo condiciones de presión hidrostática, típica de sistemas hidrotermales abiertos: en consecuencia, las profundidades de atrapamiento de las inclusiones fluidas fluctuará entre los 682 y 509 m bajo el nivel de la paleosuperficie.

## **DISCUSIÓN.**

Los estudios microtermométricos realizados revelan una historia evolutiva compleja para los fluidos hidrotermales en el yacimiento Marte, que se manifiesta en una amplia variación en los valores de salinidad de las distintas fases generadoras de vetillas, mientras que las temperaturas presentan variaciones menores (Fig. 5).

Cinco posibles factores pueden ser los responsables de las variaciones de salinidad:

- 1) presencia de dos a más generaciones de inclusiones.
- 2) modificaciones post atrapamiento, como resultado de continuas y múltiples deformaciones intracristalinas y fracturamiento que afecta a los cristales de cuarzo.
- 3) fenómenos de vaciado y estrangulamiento.
- 4) depositación a partir de sistemas completamente distintos y no relacionados, que implican cambios en las características de P-T-X de la fuente de los fluidos.
- 5) ebullición adiabática de los fluidos que originan las vetillas de cuarzo.

Debido a que todas las inclusiones fueron cuidadosamente seleccionadas y resultaban ser aparentemente primarias, puede excluirse la primera posibilidad. Los fenómenos de vaciado pueden ser parcialmente responsables de este comportamiento, sin embargo, la mayor parte de las inclusiones mostraba pocas evidencias de fracturamiento, condición necesaria para constatar la ocurrencia de este fenómeno, indicando que la contribución del vaciado al amplio rango observado es probablemente muy restringido. El estrangulamiento sólo en casos muy particulares puede ser responsable de la generación de amplios rangos de salinidad, los cuales no se observan en las inclusiones analizadas.

En el caso particular del punto cuatro, debe tenerse cuidado en distinguir entre la ocurrencia de mezcla de fluidos y la presencia de fluidos composicionalmente distintos en las vetas, en momentos distintos. En el último caso, no debería esperarse un trend evolucionario sistemático evidenciados en las muestras estudiadas (Fig. 5).

Así, la razón más probable que explica la amplia variabilidad de salinidad, observada durante el atrapamiento de las inclusiones fluidas, correspondería a un proceso continuo de fracturamiento y apertura de vetillas, que permitieron el paso recurrente de fluidos, en condiciones de ebullición adiabática. Ellas se tradujeron en varias etapas de formación de vetillas de cuarzo, que podrían ser el producto de distintos eventos hidrotermales discretos, tal como se refleja en las características de las inclusiones fluidas (zonas de crecimiento y cierre de microfracturas) a escala microscópica.

Por lo anterior, los rangos de salinidad vistos en muestras individuales son reales y reflejan amplias condiciones de fracturamiento durante la formación de las distintas etapas de formación de vetillas.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación a sido posible gracias al apoyo de la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción, que a través del Proyecto interno DIUC N° 952504-1.1 aportó los fondos necesarios, y a lo geólogos de la Compañía Minera de Mantos Blancos por su permanente colaboración.

## REFERENCIAS

- Bodnar, R. J., Burnham, C. W., y Sterner, S. M., 1985, Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III phase equilibria in the H<sub>2</sub>O-NaCl system to 1000°C and 1500 bars. *Geochim. et Cosmochi. acta.* v. 49 N°9. p 1855-2002.
- Grant, G. J y Ruiz, J., 1988, The Pb-Zn-Cu-Ag deposits of the Granadefia mine, San Francisco del Oro-Santa Barbara distric, Chihuahua, Mexico. *Econ. Geol.*, v. 83, p. 1683-1702
- Haas, J. L., Jr., 1976, Physical properties of coexisting phases and thermochemical properties of H<sub>2</sub>O component in boiling NaCl solutions: U.S. Geological Survey, Bulletin 1421-A, 73p.
- Keevil, N. B., 1942, Vapor pressures of aqueous solutions at high temperatures: *J. Am. Chem. Soc.*, 64, p 841-850.
- Potter, R. W., II y Brown, D. L., 1977, The volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0° to 500°C at pressures up to 2000 bars based on a regression of available data in the literature: U.S. Geological Survey, Bulletin 1421-A, 36 p.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Mineral. Soc. Amer. Revius in Mineralogy* 12, 644 p.
- Shepherd, T.; Rankin, A.H.; Alderton, D.H.M.; 1985. A practical guide to fluid inclusions studies. Blakie and Sons.; Bishpbriggs, Glasgow. Great Britain.
- Sillitoe, R. H., 1985, Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs: *Econ. Geol.*, v. 80, p. 1467-1514.

