

# EVOLUCIÓN DE LOS FLUIDOS HIDROTERMALES DURANTE EL PROCESO DE MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN EN EL DISTRITO MINERO HUALILÁN, PROVINCIA DE SAN JUAN

Leandro BENGOCHEA<sup>1</sup> y Graciela MAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología, San Juan 670, 8000 Bahía Blanca, CONICET.  
E-mail: lbengo@criba.edu.ar - gmas@criba.edu.ar

## RESUMEN

Se ha realizado el estudio detallado de las inclusiones fluidas en los intrusivos dacíticos del distrito minero Hualilán con el fin de evaluar la evolución de los procesos hidrotermales intervinientes durante las etapas de mineralización y alteración que afectaron a estas rocas. Hualilán está ubicado a 120 km al nornoroeste de la ciudad de San Juan. El estudio de muestras de áreas representativas de los sectores norte (Falla Sánchez) y sur (Magnata) permite establecer que han existido dos períodos de circulación de fluidos hidrotermales con características bien definidas. En el primero, que puede ser considerado como el responsable de la mineralización primaria de sulfuros, la temperatura superó holgadamente los 300°C, con un episodio de ebullición responsable de la deposición de los minerales de mena. La salinidad promedio fue de 12 % en peso eq. NaCl, con una participación importante de CaCl<sub>2</sub>. El segundo período tuvo una temperatura inferior a 300°C, también con un episodio de ebullición, y una salinidad promedio de 4,5 % en peso eq. NaCl, sin participación de calcio. Este segundo episodio puede ser considerado el responsable de la intensa oxidación hipogénica que sufrió la mineralización primaria llegando a desaparecer como tal en amplios sectores y produciendo además el total enmascaramiento de los minerales calco-silicáticos, la alteración de los diques dacíticos, la formación en superficie de cuerpos de jaseroide relacionados a las fallas normales, y la formación de minerales típicos de una alteración ácido-sulfática, superpuestos a la primer alteración de illita, caolinita, adularia. Este segundo episodio ha sido más intenso en el sector norte (Falla Sánchez) que en el sector sur.

Palabras clave: *Hualilán, inclusiones fluidas, soluciones hidrotermales.*

**ABSTRACT:** *Hydrothermal fluids during mineralization and alteration in the Hualilan Mining District, province of San Juan.*

The detailed study of the fluid inclusions in the dacitic intrusions of Hualilan mining district has been carried out to evaluate the evolution of the hydrothermal processes during the stages of mineralization and alteration that have affected these rocks. Hualilan is located 120 km to the north-northwest of San Juan city. The study of representative samples from the northern sector (Falla Sánchez) and from the southern sector (Magnata) shows two periods of circulation of hydrothermal fluids with well defined characteristics. In the first one, which can be considered the responsible of the primary sulphide mineralization, the temperature has overcome the 300°C, with a boiling episode responsible for the deposition of ore minerals, and an average salinity of 12 % in weight of NaCl eq., with an important participation of CaCl<sub>2</sub>. The second period had a temperature below 300°C, also with a boiling episode, and a salinity average of 4.5 % in weight of NaCl eq., without participation of calcium. This second episode can be considered the responsible of the intense hypogenic oxidation that has suffered the primary mineralization, ending up to its disappearance in wide sectors, and producing also the masking of the calc-silicate minerals, the alteration of the dacitic dikes, the superficial formation of jasperoid bodies related to normal faults, and the formation of minerals typical of an acid-sulfate alteration, superpose to the previous illite, caolinite and adularia alteration. The second episode has been more intense in the northern sector (Falla Sánchez) than in the southern one.

Key words: *Hualilán, fluid inclusions, hydrothermal solutions.*

## INTRODUCCIÓN

El distrito minero Hualilán está ubicado a 120 km al nornoroeste de la ciudad de San Juan (Fig. 1), a la cual está unido por caminos pavimentados de la Ruta Nacional 40 (57 km) y de la ruta provincial 436 (63 km). El distrito comprende dos sectores, Zona Sur (Minas Sentazón-Pique Sur, Muchilera y

Magnata) y Zona Norte (Mina Falla Sánchez) (Bengochea *et al.* 1988, Logan 1999).

La unidad estratigráfica más antigua en el área es la Formación San Juan de edad ordovícica, constituida por calizas y calizas dolomíticas; que forma un homoclinal de rumbo norte-sur con inclinación hacia el oeste dando lugar a la sierra de las Minas. En su flanco occidental, y en pseudoconcor-

dancia con las calizas, aflora una sucesión de lutitas, areniscas y limolitas calcáreas pertenecientes al Grupo Tucunucu de edad silúrica. En el flanco oriental afloran sedimentitas terciarias de la Formación Cuculí, cuyo contacto con las calizas es mediante un cabalgamiento de carácter regional de rumbo norte, de bajo ángulo en profundidad y alto en superficie, que ha yuxtapuesto

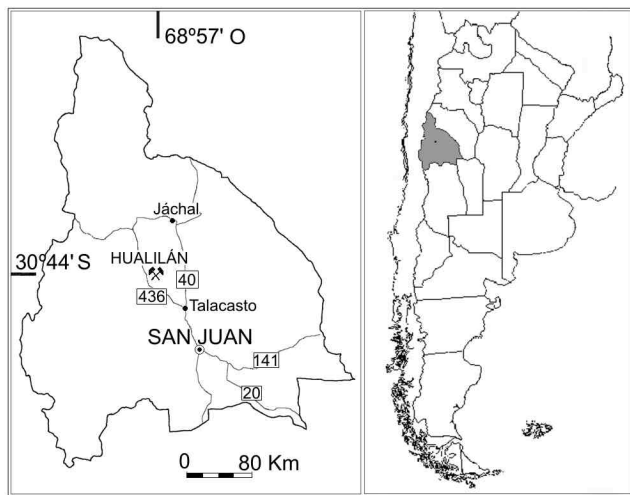


Figura 1. Mapa de ubicación.

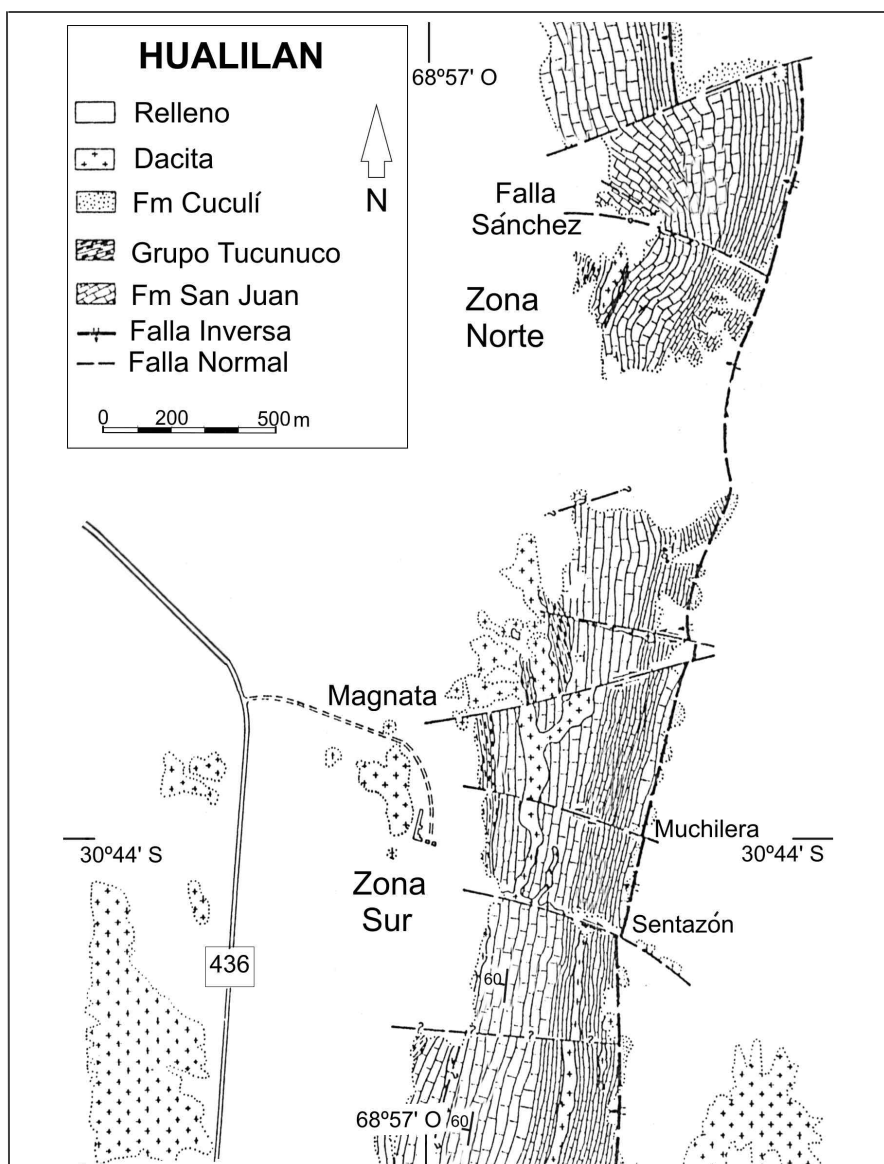


Figura 2. Mapa geológico del distrito minero Hualilán. Modificado de Bengochea *et al.* 1988.

a las calizas sobre las sedimentitas. En los alrededores del distrito afloran cuerpos subvolcánicos dacíticos de edad miocena que han intruido a todas las unidades sedimentarias constituyendo stocks, diques y filones capa. Los primeros se observan en la planicie tanto al este como al oeste de la sierra formando colinas en forma de domos, fácilmente reconocibles por su coloración blanquecina. Los diques se alojan preferentemente en las fallas de rumbo este, y los filones capa en distintos niveles de la secuencia paleozoica.

En el yacimiento se ha reconocido mineralización de skarn, relleno de fisuras, reemplazo, y diseminada. La mineralogía de la mena está constituida principalmente por pirita, pirrotina, calcopirita, galena y esfalerita (Bengochea *et al.* 1988, Taurà *et al.* 2000). Logan (1999) propone que el depósito se formó en tres estadios: skarn de progrado, skarn de retrogrado con alteración hidrotermal de los cuerpos dacíticos y deposición de la mayoría de los sulfuros, y vetas ricas en oro y galena.

Las calizas y las dacitas han ejercido un control de la mineralización en los sucesivos estadios.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del estudio de las inclusiones fluidas secundarias en fenocristales de cuarzo de los intrusivos dacíticos aflorantes en los sectores Falla Sánchez y Magnata, con el objetivo de definir la evolución de los fluidos hidrotermales durante el proceso de mineralización y alteración, pues se considera que en estas rocas han quedado reflejados los distintos procesos hidrotermales intervinientes.

Con el fin de corroborar este criterio, se analizaron muestras de dacita pertenecientes a un mismo cuerpo pero alejadas del yacimiento para establecer las características originales de las inclusiones fluidas primarias. Se identificaron inclusiones vítreas de distinto tamaño muy bien conservadas, constituidas por vidrio y una burbuja; sólo algunos ejemplares grandes muestran una incipiente desvitrificación. Asimismo, se observaron escasas inclusiones fluidas polifásicas, con tres a cuatro fases hijas sólidas definidas como de origen primario. Según Roedder (1984) la presencia de inclusiones vítreas y acuosas hipersalinas en ambientes

graníticos y en rocas filonianas explicaría una evolución gradual y/o inmiscibilidad durante la cristalización.

Los dos sectores seleccionados para el estudio, Falla Sánchez y Magnata, fueron elegidos pues se considera que son los más representativos del distrito minero Hualilán por sus características mineralógicas, fenómenos de alteración, grado de mineralización, etc. (Fig. 2). Además, presentan características diferentes entre sí. En Magnata es posible reconocer aún algunos bolsones con mineralización primaria de sulfuros y minerales cálcicos de skarn; mientras que en Falla Sánchez no quedan vestigios de esta mineralización, ya que la alteración posterior ha sido más intensa; manifestándose en un mayor grado de oxidación y en silicificación en superficie bajo la forma de cuerpos de jaseroide discordantes con la estratificación de las rocas del área y controlados por las fallas E-O de alto ángulo. Por su parte, la alteración ácido-sulfática ha sido también muy intensa en este sector.

Los rasgos distintivos de cada uno de estos dos sectores proveen una excelente oportunidad para comparar, a través del estudio de las inclusiones fluidas, la naturaleza de los fluidos responsables de la mineralización y de la alteración posterior.

En la zona de Falla Sánchez se han reconocido mediante perforaciones cinco diques de rumbo norte subparalelos, de los cuales afloran dos, uno muy potente en las calizas, y el otro de menor envergadura en las pelitas silíceas. Un sexto dique, también aflorante, tiene rumbo este y forma parte de la pared sur del cuerpo vetiforme Rajo Doña Justa (Bengochea *et al.*, 1988)

En el sector Magnata se han identificado dos diques, uno con rumbo norte y otro este. Afloran además algunos stocks en el borde oeste de la sierra.

## METODOLOGÍA

Se efectuó un muestreo detallado de cada uno de los diques y stocks aflorantes en ambas zonas. En Falla Sánchez se tomaron doce muestras, distribuidas en cada uno de los tres diques, realizándose perfiles transversales en cada caso. En Magnata se colectaron seis muestras en total, se muestreó el dique de rumbo este, otro de rumbo norte,

y dos afloramientos al oeste y al norte de la bocamina.

El estudio se ha centrado en el análisis petrográfico y termométrico de las inclusiones fluidas secundarias pues se estima que ellas están vinculadas a las soluciones que han mineralizado y alterado a las rocas del área. El estudio petrográfico se llevó a cabo sobre secciones delgadas bipulidas cuyos espesores varían entre 100 y 300 micrones. Mediante microscopio petrográfico se determinaron las distintas clases de inclusiones presentes de acuerdo al tipo y número de fases intervinientes a temperatura ambiente, relaciones entre ellas en cada muestra, y entre las distintas muestras.

A partir de estos criterios se han podido determinar cuatro clases distintas de inclusiones. De acuerdo al origen, se identificaron inclusiones primarias, es decir que se formaron durante la cristalización de la roca y por ende pueden considerarse contemporáneas con el cuarzo que las contiene. Estas inclusiones, de naturaleza vítrea, han entrampado porciones variables de magma; y si bien no tienen ninguna relación genética con los procesos posteriores de alteración y mineralización, han sufrido transformaciones como consecuencia de los mismos, pudiéndose observar que su interior no es límpido sino que se observa de color pardo y con aspecto "sucio". Este fenómeno se debe a la desvitrificación sufrida por el vidrio entrampado en dichas inclusiones probablemente por efectos termales (Varela y Bengochea 1991).

Las otras tres clases de inclusiones, de acuerdo a su origen, son consideradas secundarias, es decir que se han formado a partir de soluciones temporalmente posteriores a la formación de la roca. Se presentan siempre alineadas formando trenes que tienen continuidad a través de los cristales de cuarzo.

De acuerdo a lo descrito, los tipos de inclusiones presentes en las muestras estudiadas son los siguientes:

**Inclusiones vítreas (primarias).** En la totalidad de las muestras estudiadas de ambos sectores, se han observado escasas inclusiones grandes ( $>10\mu\text{m}$ ) que a su vez están totalmente desvitrificadas.

### **Inclusiones líquidas**

**Tipo I (secundarias).** Inclusiones que contienen dos fases fluidas, una líquida y

otra gaseosa que ocupa un volumen menor del 30% del total. Se desarrollan bajo la forma de planos y trenes, en general de corta extensión. Se presentan en todas las muestras estudiadas, adoptando formas de cristales negativos con tamaños que oscilan entre 10 y 15  $\mu\text{m}$ , o formas irregulares y de mayor tamaño, generalmente más de 15  $\mu\text{m}$ . A su vez, en este tipo se pueden diferenciar dos subtipos. Por una lado las inclusiones de mayor tamaño que superan los 15  $\mu\text{m}$  y presentan la interfase burbuja / líquido muy marcada, indicando en principio una diferencia apreciable en los índices de refracción de ambas fases. Estas inclusiones se agrupan según trenes bien definidos, pero en general cortos y algo curvados. Se las denomina tipo Ia.

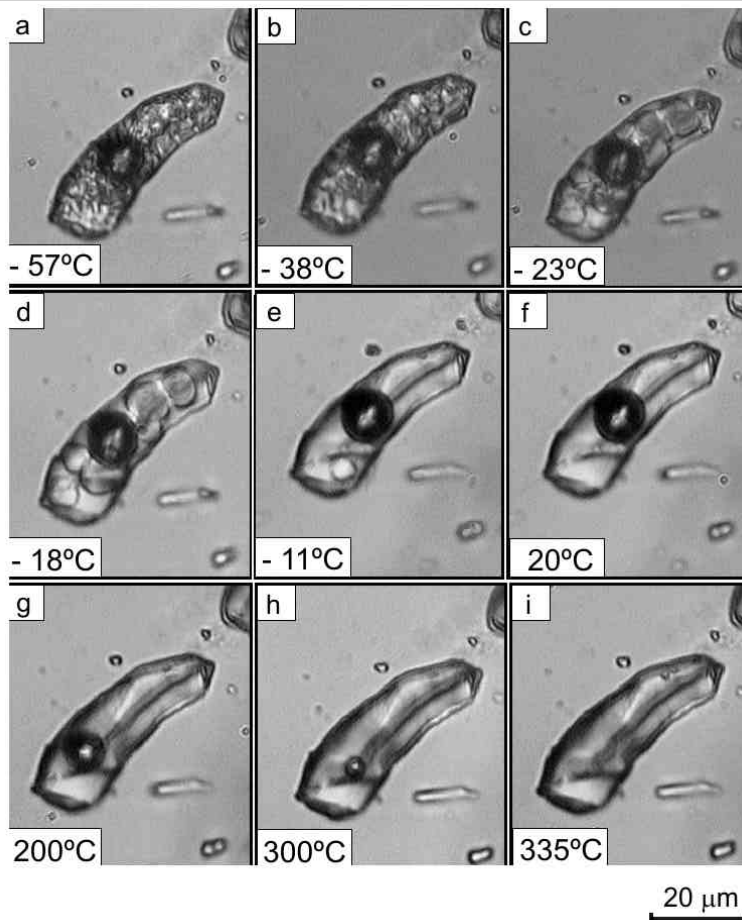
Por otro lado, también se observaron escasos trenes más largos y rectos, de inclusiones más pequeñas, que en general no superan los 10-15  $\mu\text{m}$ , si bien esporádicamente se observa alguna mayor. La interfase burbuja / líquido en este tipo de inclusiones es más tenue. Se las denomina tipo Ib.

**Tipo II (secundarias).** Contienen dos fases fluidas, una líquida y otra gaseosa que ocupa un volumen mayor al 70% del total. En general tienen formas de cristales negativos y se agrupan en planos y trenes de dimensiones variables. Su presencia es constante en la mayoría de las muestras pero su distribución es heterogénea.

En algunos trenes se observan coexistiendo con inclusiones de tipo III.

**Tipo III (secundarias).** Inclusiones trifásicas formadas por dos fases fluidas y una sólida consistente en un cristal de hábito cúbico e isotrópico. También se presentan agrupadas formando trenes. Son más escasas que las anteriores.

El estudio petrográfico de las muestras de Falla Sánchez evidencia que la presencia y/o abundancia relativa de cada tipo de inclusiones no es aleatoria sino que responde a un patrón dado. En el cuarzo de las muestras extraídas en los contactos de los diques con la roca de caja son muy abundantes los trenes de inclusiones tipo I, mientras que los trenes de las tipo II son muy escasos o inexistentes. Además, no se observan inclusiones tipo III, y de perdurar alguna vítrea está totalmente desvitrificada. En las sucesivas muestras hacia el centro de



**Figura 3:** Inclusion fluida tipo Ia.

cada dique, disminuyen los trenes de inclusiones tipo I y son más abundantes los de tipo II. En algunas muestras también se observan escasos trenes de tipo III. En Magnata, las muestras pertenecientes a los diques tienen las mismas características que las del sector Falla Sánchez, principalmente en lo que respecta a los tipos de inclusiones presentes y sus abundancias relativas. Por otro lado, en las muestras de los dos afloramientos, al oeste y norte respectivamente de la bocamina de Magnata, son abundantes los trenes de inclusiones tipo II y aquellos formados por inclusiones tipo I, y en particular tipo Ia.

#### TERMOMETRÍA DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS

Los estudios termométricos de las inclusiones fluidas se realizaron con una platina Linkam computarizada que permite operar en el rango de  $-180^{\circ}$  a  $+600^{\circ}\text{C}$  por una

combinación de un sistema de enfriamiento por nitrógeno líquido y una resistencia para calentamiento, instalada en un microscopio petrográfico Olympus BX50 con oculares  $\times 10$  y  $\times 25$  y objetivo Leitz UTK50/0.63. La platina fue calibrada con sustancias estándares puras, con punto de fusión conocido, desde  $+400^{\circ}\text{C}$  hasta el punto de fusión del hielo, a  $0^{\circ}\text{C}$ . En el rango de baja temperatura se midió el punto triple del  $\text{CO}_2$  ( $-56,6^{\circ}\text{C}$ ) utilizando inclusiones naturales de  $\text{CO}_2$  puro de la localidad de Calanda, Suiza (Tourey 1968), y el punto triple del  $\text{H}_2\text{O}$ , con agua destilada. En la etapa de termometría se tuvieron en cuenta las características determinadas en el estudio petrográfico, principalmente en lo referente a los dos tipos de inclusiones tipo I. En la medida de lo posible, se efectuaron 30 mediciones de temperaturas de homogeneización en cada muestra. Los resultados obtenidos han permitido comprobar que en la mayoría de las muestras existen dos

poblaciones desde el punto de vista termométrico, una con temperaturas medias mayores a  $300^{\circ}\text{C}$  y la otra con temperaturas menores. El primer conjunto está constituido por inclusiones con burbuja de contorno marcado y de un tamaño en general mayor a  $15\ \mu\text{m}$ , agrupadas en trenes cortos curvados (tipo Ia). El segundo, por inclusiones más pequeñas, de burbuja tenue y pertenecientes a trenes rectos y largos (tipo Ib). En el sector Falla Sánchez se midieron 342 inclusiones en las 12 muestras estudiadas, y se puede considerar que la población Tipo Ib está presente en un 70% aproximadamente (233 mediciones). Las temperaturas medidas para esta población fluctúan entre un mínimo de  $247^{\circ}\text{C}$  y un máximo de  $300^{\circ}\text{C}$ , con una temperatura media de  $279,5^{\circ}\text{C}$  y con un desvío estándar ( $s$ ) de 11,67.

A su vez, la población tipo Ia representa el 30% restante en las muestras. Se midieron 109 inclusiones en las 12 muestras estudiadas. Las temperaturas medidas fluctúan entre un mínimo de  $300^{\circ}\text{C}$  y un máximo de  $350^{\circ}\text{C}$ , con una temperatura media de  $309,4^{\circ}\text{C}$  y un desvío estándar ( $s$ ) de 7,75. Por otro lado, en Magnata, en las seis muestras estudiadas, la presencia de ambas poblaciones es más equilibrada. La población tipo Ib representa el 52% con 95 mediciones efectuadas, que fluctuaron entre  $233^{\circ}\text{C}$  y  $300^{\circ}\text{C}$ , una temperatura media de  $273,1^{\circ}\text{C}$  y un desvío estándar ( $s$ ) de 18,15. La población tipo Ia con 86 mediciones representa el 48%; la temperatura mínima medida fue de  $302^{\circ}\text{C}$  y la máxima de  $355^{\circ}\text{C}$  con una temperatura media  $322,6^{\circ}\text{C}$  y un desvío estándar ( $s$ ) de 13,49. La cantidad de inclusiones medida en cada población es representativa de la participación y abundancia de cada una de ellas en las respectivas muestras.

En el cuadro 1 se muestran los resultados de las temperaturas mínimas, máximas y medias obtenidas en las 18 muestras estudiadas.

Las inclusiones vapor tipo II, que indican la existencia de fenómenos de ebullición, en general son más abundantes en Magnata que en Falla Sánchez, y a su vez, en este sector son más abundantes en las muestras pertenecientes a la parte central de los diques. La termometría sobre este tipo de

**CUADRO 1:** Datos termométricos de las muestras estudiadas.

	Muestra	Nº Incl. medidas	Población Tipo Ib		Población Tipo Ia		Nº Incl. medidas	Intervalo Temp. (°C)		Temp. media (°C)	Desvío estándar ( $\sigma$ )
			Intervalo Temp. (°C)		Temp. media (°C)	Desvío estándar ( $\sigma$ )		Intervalo Temp. (°C)			
			Mínima	Máxima				Mínima	Máxima		
Sánchez	1211	21	247,7	293,1	273,0	15,6	9	300,8	315,7	305,9	4,9
	0811	25	262,8	293,2	277,8	7,2	5	300,0	349,9	318,1	17,1
	0911	25	259,5	292,6	277,9	8,0	5	300,4	305,7	303,1	2,1
	1011	25	275,6	299,2	282,5	11,2	7	300,2	319,3	309,3	6,3
	1411	28	264,2	299,9	282,9	10,6	2	300,6	305,5	303,5	2,9
	1611	14	259,8	296,1	276,5	12,1	16	301,1	325,2	311,0	6,8
	1711	27	251,2	299,1	277,0	14,4	3	301,7	310,8	306,2	3,7
	1811	11	266,4	286,7	274,9	5,2	12	304,9	326,5	311,9	5,6
	2211	13	267,8	299,6	282,5	13,0	11	302,0	317,9	310,1	6,2
	2111	19	279,4	297,5	286,9	4,8	11	300,8	313,4	308,9	4,4
	2011	7	255,0	298,9	282,4	17,3	23	300,1	321,0	306,0	6,0
2311	18	265,8	287,9	278,7	6,6	5	317,9	3321,2	320,8	2,2	
Magnata	1412	9	268,1	299,7	288,3	10,1	20	302,2	331,6	314,8	8,9
	1312	13	233,4	298,5	271,6	21,0	17	302,6	354,7	330,2	17,1
	1112	21	247,9	288,3	274,6	12,8	8	306,3	339,8	323,7	12,8
	1212	12	241,9	299,4	280,8	18,3	12	303,8	324,6	314,2	5,5
	1012	22	247,6	299,2	268,2	17,8	10	304,2	349,7	327,2	15,8
	0913	18	241,9	299,5	265,2	17,1	19	304,7	334,7	325,1	7,4

inclusiones resulta bastante difícil debido a razones técnicas, pues generalmente es muy difícil visualizar el exacto momento de desaparición de la película de líquido, por lo que la temperatura de homogeneización a vapor generalmente tiene un porcentaje de error por exceso en su determinación. De esta manera, se determinaron dos poblaciones de inclusiones tipo II, una con tempera-

turas entre 295° y 305°C, y otra entre 365° y 375°C. Las inclusiones pertenecientes a la población de menor temperatura son más frecuentes en el sector Falla Sánchez, y las de la segunda en Magnata.

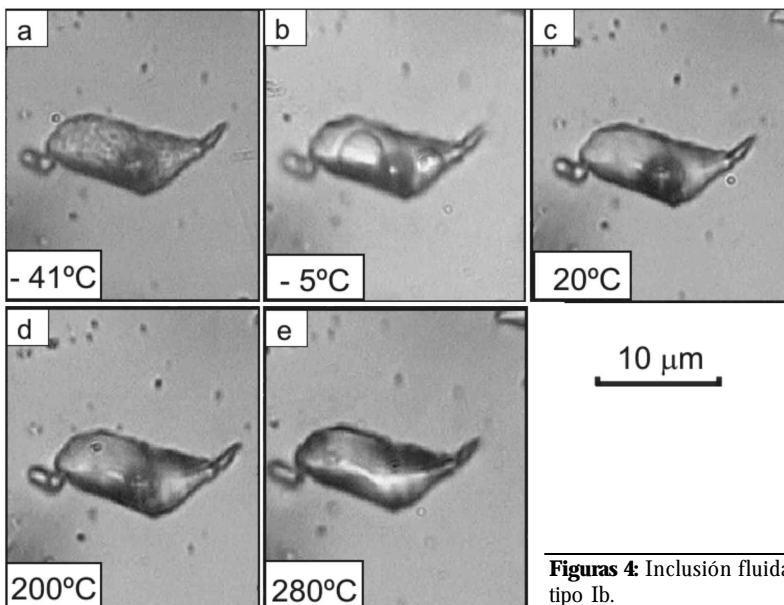
De acuerdo a estos resultados se puede relacionar a las inclusiones tipo II de menor temperatura con las tipo Ib, y las tipo II de mayor temperatura con las tipo Ia. De esta

manera, se puede considerar que han existido dos momentos de ebullición en la historia del yacimiento.

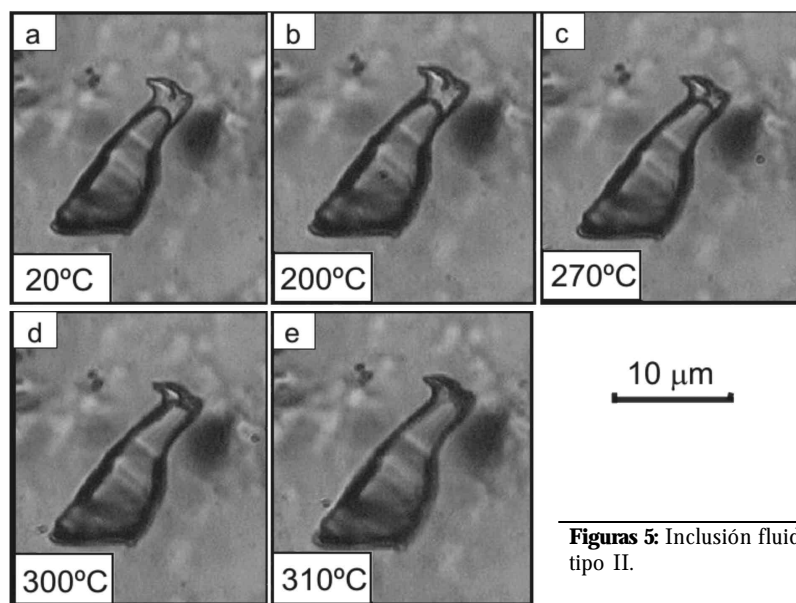
Las inclusiones trifásicas (tipo III) se presentan en muy pocas muestras, pero siempre relacionadas con las inclusiones tipo II. En general coinciden las temperaturas de homogeneización y de disolución del cristal de halita. Se puede considerar una temperatura promedio de 280°C.

Las inclusiones que muestran este comportamiento son interpretadas por numerosos autores como formadas a partir de fluidos en ebullición, ya que este proceso aumenta la salinidad del fluido acuoso remanente, que alcanza así su punto de saturación. La salinidad, calculada a partir de la temperatura de disolución del cristal de halita, es de 37% en peso de NaCl eq.

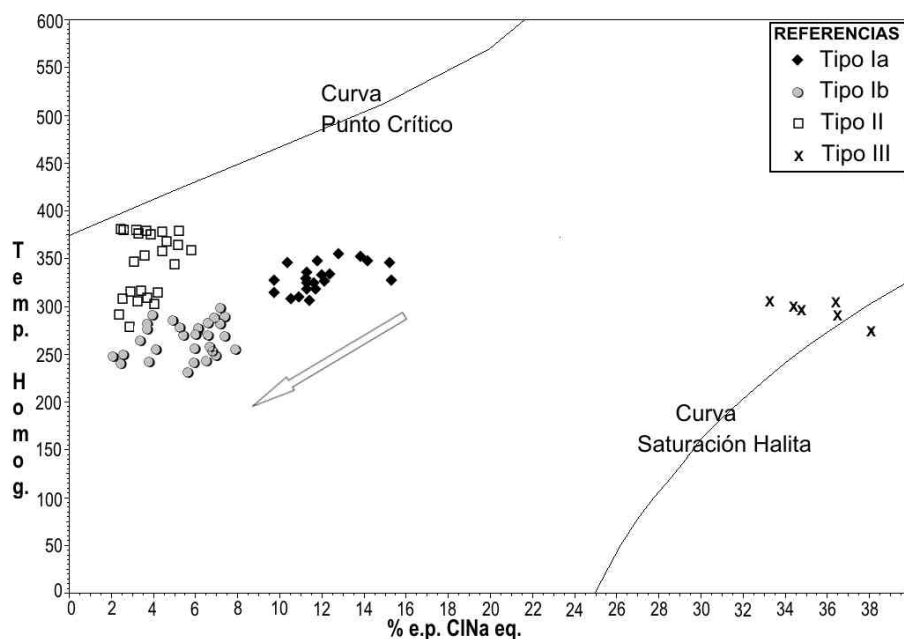
También se realizaron estudios termométricos por congelamiento con el fin de determinar la composición salina de los fluidos no saturados intervinientes. En la mayoría de las muestras se pudo comprobar la existencia de dos tipos de soluciones de acuerdo al comportamiento a bajas temperaturas. Las inclusiones tipo Ia congelaron a aproximadamente -60°C. Durante el descongelamiento, a partir de -53°C aproximadamente, comenzó a descongelarse una fase que se



**Figuras 4:** Inclusiones fluidas tipo Ib.



**Figuras 5:** Inclusión fluida tipo II.



**Figura 6:** Temperatura de homogeneización vs. salinidad.

manifiesta por un movimiento perceptible en el interior de la inclusión. Entre -47°C y -45°C se hizo más intenso el descongelamiento observándose una deformación continua y cambiante de la burbuja a medida que la temperatura aumentaba lentamente. Este proceso continuó hasta -26,3°C. A partir de esta temperatura no se observó ningún cambio significativo, pero desde -17°C comenzó un desplazamiento suave pero constante de la burbuja, indicando el descongelamiento del hielo, y entre -11° y

-7°C se produjo el descongelamiento total. Una temperatura de primer fusión inferior a -20,8°C (temperatura eutéctica del NaCl), indica la presencia de otras sales además de ésta. Precisamente, la temperatura eutéctica de primer fusión a -53°C confirma la presencia de CaCl<sub>2</sub>. Es decir, cuando la inclusión fue congelada, se formaron tres fases sólidas: hielo + hidrohalita (NaCl·2H<sub>2</sub>O) + antarcticita (CaCl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O). La temperatura eutéctica (-53°C) a la cual se observó el primer movimiento corresponde a la fusión

del hidrato de calcio. A partir de ese momento la inclusión contiene hielo + hidrohalita + líquido. Durante el posterior calentamiento continúa la formación de líquido, hasta que a -26,3°C la hidrohalita termina de fundir totalmente, quedando solo hielo + líquido en la inclusión. A medida que la temperatura sigue aumentando comienza a fundirse el hielo, hasta que finalmente funde el último cristal de hielo en el intervalo indicado.

Utilizando un diagrama ternario H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub> se puede determinar la salinidad total expresada en porcentaje en peso equivalente de NaCl, como así también los porcentajes correspondientes a cada una de las sales constituyentes. De acuerdo a las temperaturas de fusión determinadas experimentalmente, este tipo de inclusiones tienen una salinidad total promedio de 12,11 % en peso NaCl eq.; constituida por 4,61% de NaCl y 7,50 % de CaCl<sub>2</sub>.

En la figura 3 se puede observar la secuencia de cambios de fases descrita en una inclusión fluida tipo Ia sometida a congelamiento y a calentamiento; por ejemplo, en 3e aún perdura el último cristalito de hielo, pero es inminente su desaparición. La temperatura de congelamiento en esta inclusión ha sido -10,3°C.

Por otro lado, las inclusiones tipo Ib tuvieron un comportamiento distinto a las anteriores durante las experiencias de congelamiento. Como consecuencia del sobreenfriamiento congelaron a temperaturas entre -40° y -50°C. Durante el aumento gradual de la temperatura no se observaron cambios de fases hasta -21°C aproximadamente. En este punto se produjo el descongelamiento de la hidrohalita; de allí en más, y especialmente a partir de -15°C, se observó muy bien el descongelamiento del hielo que se produjo entre -1,4° y -4,7°C, determinándose una temperatura media del punto final de descongelamiento del hielo de -2,73°C, con una salinidad promedio de 4,40 % en peso eq. de NaCl.

En la figura 4 se puede observar la secuencia de cambios de fases descrita en una inclusión fluida tipo Ib sometida a congelamiento y a calentamiento. Por ejemplo en 4b persisten dos cristalitos de hielo que finalmente desaparecieron a -3,9°C.

En las inclusiones vapor tipo II las experien-

cias de congelamiento generalmente presentan dificultades técnicas, principalmente de visualización y determinación del momento exacto que se produce la última fusión de hielo debido al escaso líquido que presentan este tipo de inclusiones. Pero por otro lado, en general no hay mucha dispersión de los datos, precisamente como consecuencia del escaso líquido presente que resulta de la condensación del vapor entrampado. En las inclusiones con temperaturas de homogeneización entre 295°C y 305°C las salinidades determinadas variaron entre 2 % y 4 % en peso de NaCl eq.; por otra parte en las de temperaturas de homogeneización entre 365° y 375°C se determinaron salinidades entre 3 % y 6 % en peso de NaCl eq.

En la figura 5 se puede observar una inclusión tipo II sometida a calentamiento. En la secuencia se registra claramente la expansión que experimenta la fase vapor a medida que se aumenta la temperatura hasta lograr la homogeneización a vapor a 310°C. Las experiencias de congelamiento no pudieron ser fotografiadas con buena calidad.

## CONSIDERACIONES

Del análisis de los resultados petrográficos y termométricos obtenidos se puede interpretar que existen dos poblaciones de inclusiones fluidas secundarias tipo I perfectamente diferenciadas:

Tipo Ia: inclusiones de tamaño superior a 15 µm, con burbuja marcada, agrupadas en trenes cortos curvados, que tienen temperaturas de homogeneización entre 300° y 350°C. La salinidad promedio es de 12 % en peso NaCl eq., con participación de sodio y calcio.

Tipo Ib: inclusiones de tamaño promedio de 10 µm, con burbuja tenue, agrupadas en trenes rectos largos, que tienen temperaturas medias de homogeneización entre 240° y 300°C, y una salinidad promedio de 4,5 % en peso NaCl eq.

Las segundas son mucho más abundantes en las muestras del sector Falla Sánchez, en una relación de 2,5:1, mientras que en Magnata la relación entre ambas poblaciones es más equilibrada, aproximadamente 1:1. A su vez, en los diques de Falla Sánchez se observa una gradación desde los bordes hacia el centro, siendo más abundantes las

inclusiones del tipo Ib en la zona del contacto. Con respecto a las inclusiones tipo II también se han determinado dos poblaciones, pudiéndose considerar que sus intervalos de temperaturas son 295° a 305°C y 365° a 375°C respectivamente.

En la figura 6 se grafican los datos obtenidos para las distintas poblaciones de inclusiones fluidas, relacionando temperaturas de homogeneización vs. porcentaje de salinidad. Se puede observar que en las inclusiones fluidas bifásicas líquidas existen dos poblaciones netamente diferenciadas. A su vez, en las inclusiones bifásicas vapor también se diferencian dos poblaciones. De la interpretación de dicho gráfico se desprende que los fluidos de mayor temperatura y salinidad (tipo Ia) han evolucionado hacia fluidos de menor temperatura y salinidad (tipo Ib). Cada uno de estos dos períodos ha tenido episodios de ebullición que se manifiestan claramente diferenciados en el gráfico. Las inclusiones fluidas saturadas (tipo III) corresponderían a la fase densa diferenciada durante el proceso de ebullición correspondiente a las inclusiones tipo Ib.

Numerosos autores han estudiado la evolución de las soluciones mineralizantes en este tipo de yacimientos. Entre otros se puede citar a Rye (1985) que para el depósito Carlin en Nevada concluyó que los fluidos de mena ebulleron hacia el final del estadio principal, y que posiblemente excedieron los 200°C durante la ebullición; las salinidades llegaron hasta el 18% como consecuencia de la ebullición y la disolución de enormes cantidades de carbonato en la parte superior del cuerpo de mena. Además, este proceso fue el principal responsable de la oxidación y lixiviado de la parte superior del depósito. En Gold Acres, Nevada, se halló mineralización de skarn, y se sugiere que la mena de oro fue depositada en el estadio póstumo (waning) del sistema hidrotermal que produjo el skarn (Tooker 1985). White (1985) en su trabajo sobre depósitos de oro-plata diseminados en la Gran Cuenca, especialmente en Nevada, refiere que Nash (1972) llevó a cabo un trabajo muy extenso de inclusiones fluidas en este tipo de yacimientos, concluyendo que, por ejemplo, en Gold Acres los fluidos tenían una salinidad entre 5,4% y 7,3%, aunque las temperaturas de homoge-

neización obtenidas, entre 160° y 185°C, son considerablemente más bajas que las típicas vetas hidrotermales. Wotruba et al. (1986) estudiaron el depósito de oro y plata Fortitude en el distrito de Copper Canyon. Ellos definen que las mineralizaciones en ese distrito están relacionadas espacial y temporalmente con un plutón granodiorítico y sus diques relacionados de edad terciaria media, que intruyeron una secuencia de rocas sedimentarias y produjeron un contacto metamórfico con alteración metasomática alrededor del plutón que se extiende varios cientos de metros en las rocas paleozoicas. La mineralización está relacionada a fluidos hidrotermales que se desarrollaron en el último estadio de la intrusión. Logan (1999) estudió el skarn de mina Hualilán y definió tres estadios, el primero fue responsable de la formación del skarn de progrado, el segundo correspondería al skarn de retrogrado que produjo la alteración y mineralización de la mayoría de los sulfuros (pirita, calcopirita, esfalerita); y por último el tercer estadio sería responsable de la mineralización de galena principalmente, sugiriendo un descenso de temperatura y salinidades y posible mezcla de fluidos. Bengochea et al. (1988) y Bengochea y Mas (1997) estudiaron las inclusiones fluidas en cuarzos de la mineralización, correspondientes al segundo y tercer estadio de Logan (1999). A partir de estos estudios proponen que la temperatura de las soluciones de las mineralizaciones post-skarn fluctúan entre 290° y 340°C y sus salinidades en el orden de 10% en peso NaCl eq., y que se han producido episodios de ebullición. Taurà et al. (2000) determinaron en la esfalerita de este yacimiento temperaturas de homogeneización entre 280° y 300°C y salinidades entre 10% y 12 % en peso NaCl eq.

## CONCLUSIONES

De la interpretación de los resultados obtenidos de los estudios petrográficos y termométricos de las inclusiones fluidas en los diques dacíticos, se puede considerar que dentro del amplio intervalo de temperatura y salinidad establecido previamente, es posible ahora establecer que han existido dos períodos o episodios de circulación de fluidos hidrotermales con características

bien definidas cada uno que afectaron y quedaron registradas en las rocas dacíticas.

El primero, que podría ser considerado como el responsable de la mineralización primaria de sulfuros, posiblemente corresponde a la fase póstuma del sistema hidrotermal que produjo el skarn. La temperatura de estas soluciones ha superado holgadamente los 300°C, ha tenido un episodio de ebullición posiblemente responsable de la depositación de los minerales de mena, y la salinidad promedio fue de 12 % en peso eq. NaCl, con una participación importante de CaCl<sub>2</sub>. La incorporación del calcio se produjo como consecuencia de la disolución de las calizas.

El segundo episodio tuvo una temperatura inferior a 300°C con un período de ebullición, y una salinidad promedio de 4,5% en peso eq. NaCl pero sin participación de calcio. Estas soluciones pueden ser consideradas las responsables de la intensa oxidación hipogénica que sufrió la mineralización primaria llegando a desaparecer como tal en amplios sectores produciendo su alteración y total enmascaramiento de los minerales calco-silicáticos. Además dio como resultado la fuerte alteración de los diques dacíticos en el ámbito de la mina, particularmente en Falla Sánchez, la formación de grandes cuerpos de jaseroide en superficie relacionados a las fallas normales, y la formación de minerales secundarios típicos de una alteración ácido-sulfática, como por ejemplo jarosita, alunita y yeso, superpuestos sobre la primera alteración de illita, caolinita, adularia. Este segundo episodio ha sido más intenso en el sector Falla Sánchez que en Magnata.

Finalmente, de acuerdo a los resultados alcanzados se corrobora que el estudio de las inclusiones fluidas en rocas de caja es un

método válido para interpretar la evolución de los fluidos mineralizantes.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Sur (Bahía Blanca) por brindar el apoyo económico mediante subsidios de investigación para llevar a cabo este estudio y por el uso de laboratorios y equipamiento. Asimismo, desean agradecer a los árbitros de la revista por las observaciones y sugerencias realizadas, al Dr. Ricardo Auriemma y al Lic. Facundo Auriemma de la Compañía Minera El Colorado por facilitar el acceso al yacimiento en la oportunidad de realizar los trabajos de campo.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bengochea, J.D., Bengochea, L. y Mas, G. 1988. Inclusiones Fluidas en el Yacimiento de Oro en Calizas Hualilán, Provincia de San Juan, República Argentina. 3º Congreso Nacional de Geología Económica 1: 251-267, Olavaria.
- Bengochea, L. y Mas, G. 1997. Fluid Inclusions in quartz veinlets from the mineralization of the gold mine Hualilán, San Juan province, Argentine. 14 ECRO-FI Proceedings, 37-39; Nancy.
- Logan, A.V. 1999. Distritos auríferos de Gualilán y Gualcamayo, San Juan. Recursos minerales de la República Argentina, Ed. E.O. Zappetini. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR. Anales 35: 1525-1534, Buenos Aires.
- Nash, J.T. 1972. Fluid-inclusion studies of some gold deposits in Nevada. Geological Survey Research: U.S. Geological Survey Professional Paper 800-C, 15-19.
- Roedder, E. 1984. Fluid Inclusions. En P. Ribbe (ed.) Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, 12: 149-179.
- Rye, R.O. 1985. A model for the formation of carbonate-hosted disseminated gold deposits based on geologic, fluid inclusion, geochemical, and stable isotope studies of the Carlin and Cortez deposits, Nevada. United States Geological Survey Bulletin 1646: 35-42.
- Taurà, D., Bengochea, L., Soler, A., Mas, G. y Cardellach, E. 2000. El skarn mineralizado en Zn-Cu(Au) de Hualilán (Provincia de San Juan, Argentina): datos preliminares. Cadernos. Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular 25: 321-325.
- Tooker, E.W. 1985. Geologic Characteristics of Sediment-and volcanic-Hosted Disseminated Gold Deposits- Search for an occurrence Model. U.S. Geological Survey Bulletin 1646.
- Tourey, J. C. 1968. Recherches Geochemiques sur les inclusions a CO<sub>2</sub> liquide. Bulletin Société Française Minéralogie et Cristallographie 91: 367-382.
- Varela M.E. y Bengochea, L. 1991. Inclusiones Magmáticas en Intrusivos Riodacíticos del Distrito Minero Los Manantiales, Provincia de Chubut, República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 46(3-4): 295-298.
- White, D. E. 1985. Vein and disseminated Gold-Silver deposits of the Great Basin through space and time. United State Geological Survey Bulletin 1646: 5-14.
- Wotruba, P.R., Benson, R.G. y Schmidt, K.W. 1986. Battle Mountain describes the geology of its Fortitude gold-silver deposit at Copper Canyon. Mining Engineering. 38(7): 495-499.

Recibido: 18 de octubre, 2004

Aceptado: 1 de noviembre, 2005