

# Análisis de balance de masas en la roca de caja con alteración hidrotermal asociada a la mineralización aurífera del distrito Culampajá, Catamarca, Argentina

Facundo Martínez,<sup>1,2</sup>; Ana S. Fogliata<sup>1,2</sup>; Steffen G. Hagemann<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán.

<sup>3</sup> Centre for Exploration Targeting, University of Western Australia, Australia.

► **Resumen** — En la sierra de Altohuasi – Culampajá (provincia de Catamarca), perteneciente a Sierras Pampeanas Occidentales, se localizan manifestaciones auríferas vetiformes emplazadas en un granitoide deformado de posible edad cambro – ordovícica. El rasgo estructural más característico del área está representado principalmente por una zona de cizallamiento de rumbo NNW-SSE. La alteración hidrotermal predominante de la roca de caja es la sericitización. También se observó feldespatización localizada. Las vetas están formadas por cuarzo como principal mineral de ganga acompañado de pirita, calcopirita, oro nativo, covelina, goethita, hematita, azurita y malaquita. En este trabajo se estudiaron tres áreas relacionadas a la mineralización aurífera: La Rosario, Tajo Largo (dentro del grupo El Moradito), y La Alumbra y un sector conocido como Lomas del Pachao ubicado 10,5 km al sur de la quebrada de La Alumbra. El estudio geoquímico de balance de masa en la roca de caja granítica por medio del diagrama de isoconas indica que existen pérdidas de Fe y Ca en todas las muestras, y en algunos casos de Mg. También se observó enriquecimiento en K en algunas muestras. Se destaca, por otra parte, la adición en todas las muestras estudiadas de algunos elementos traza metálicos como Au, Pb, Y, U, Bi, W y Sn. Los resultados geoquímicos, sumados a las características petrográficas, indicarían que en el área de estudio los fluidos mineralizantes presentan homogeneidad geoquímica.

**Palabras clave:** Alteración hidrotermal, vetas de cuarzo auríferas, geoquímica.

► **Abstract** — “Mass balance analysis in the hydrothermal alteration wall rock, Culampajá gold District, Catamarca, Argentina”. In the Altohuasi-Culampajá mountains, (located in Catamarca province), which are part of the Sierras Pampeanas Occidentales, gold bearing quartz veins crosscut a deformed granite, of possibly Cambrian-Ordovician age. The most characteristic structural feature of the area is mainly represented by a NNW-SSE trending shear zone. The hydrothermal alteration is dominated by sericitic alteration. Locally K-feldspathization is also observed. The mineralogy of the veins is defined by quartz as the main gangue mineral with pyrite, chalcopyrite, native gold, covellite, goethite, hematite, azurite and malachite. Three gold-bearing areas were investigated: Tajo Largo (within the El Moradito group), La Rosario, La Alumbra and Lomas del Pachao located 10.5 km south of the Quebrada de La Alumbra. The geochemical mass balance study of the granitic wall rock, using the isocon method, indicate Fe and Ca depletion in all samples, and Mg depletion in some cases. K enrichment was observed in some samples, and Au, Pb, Y, U, Bi, W and Sn are also enriched. Geochemical and petrographic studies, indicate an homogeneous hydrothermal fluid in the mineralized studied area.

**Keywords:** Hydrothermal alteration, auriferous quartz veins, geochemistry.

## INTRODUCCIÓN

La sierra de Altohuasi – Culampajá se encuentra ubicada en la provincia geológica de Sierras Pampeanas Occidentales (Ramos, 1999) cerca del límite con la Puna en la

provincia de Catamarca. En ella se localizan manifestaciones auríferas vetiformes mineralizadas. La zona de estudio se encuentra limitada por las quebradas de Lampacito al Norte y de La Alumbra al Sur, aproximadamente entre las latitudes S 27°02' y 26°56' y las longitudes O 67°01'30" y 66°58'30". Las manifestaciones corresponden a vetas de

cuarzo portadoras de oro emplazadas en un granitoide deformado denominado Formación Chango Real (Turner, 1962) (figura 1).

El objetivo de este trabajo es analizar la alteración hidrotermal que afectó a la roca de caja de las vetas de cuarzo portadoras de mineralización por medio de estudios petrográficos y geoquímicos de balance de masas por el método gráfico de isoconas de Grant (1986). Para ello, se colectaron muestras de rocas encajantes sin alteración y con evidencias de distintos tipos y grados de alteración hidrotermal. Esto se llevó a cabo en tres zonas mineralizadas y en una alejada de la mineralización. Esto permitió analizar los cambios mineralógicos y químicos (ganan-

cias y pérdidas) de los fluidos mineralizantes durante el proceso de alteración.

## GEOLOGÍA REGIONAL

Las rocas más antiguas de la región afloran en las Lomas del Pachao al sudeste de la zona de estudio y constituyen el basamento cristalino de posible edad precámbrico – cámbrico inferior (Aceñolaza y Toselli, 1981). Corresponden a metamorfitas de bajo grado grisáceas a pardo verdosas, producto del metamorfismo regional de la facies esquistos verdes que afectó a sedimentos pelíticos y grauváquicos. Litológicamente se trata de esquistos, cuarcitas, filitas y pizarras de-

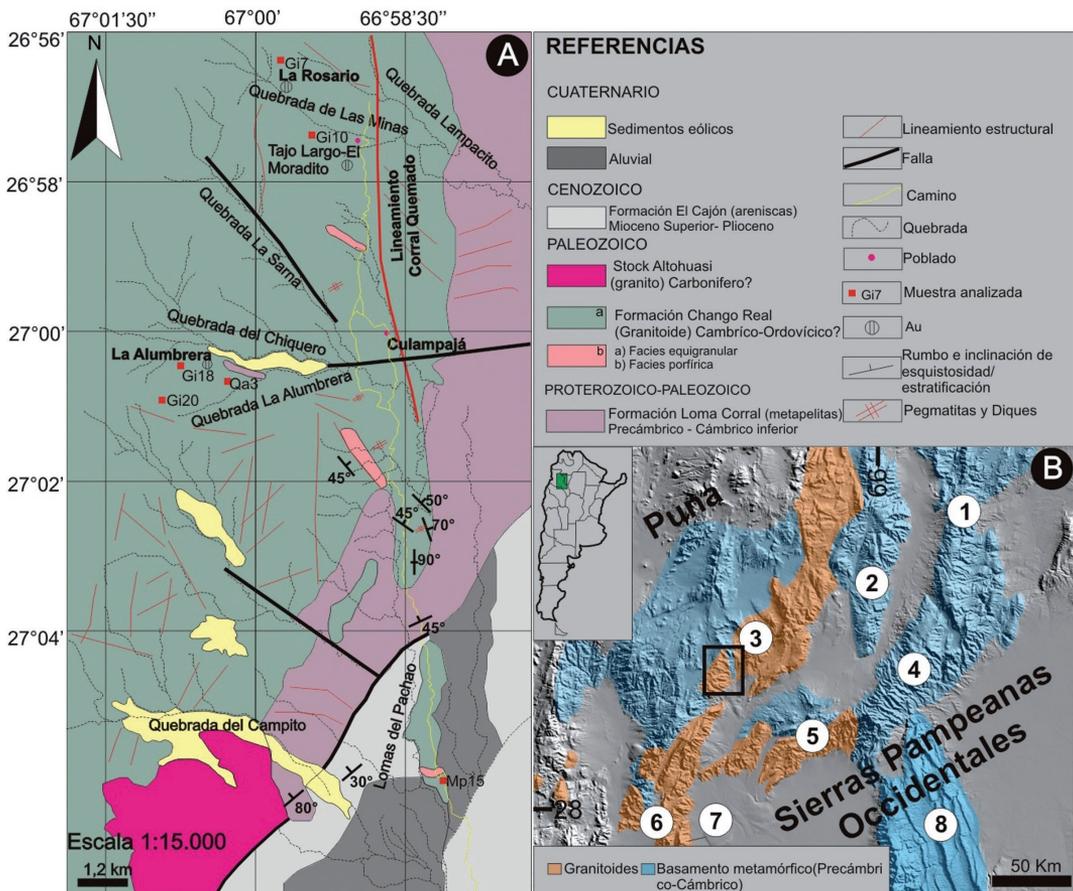


Figura 1. A) Mapa Geológico del Área de estudio. B) Mapa litológico del basamento ígneo-metamórfico de las Sierras Pampeanas Occidentales: 1) Cumbres Calchaquíes 2) Quilmes, 3) Altohuasi-Culampajá, 4) Aconquija, 5) Capillitas, 6) Zapata, 7) Vinquis, 8) Los Llanos-Potrerillos (Modificado de Grosse, 2007).

nominadas en conjunto Formación Loma Corral (Turner, 1962). Esta unidad presenta una marcada esquistosidad de rumbo general NE-SO y se haya intruida por granitoides paleozoicos que afloran en la región.

Las rocas graníticas más abundantes del área de estudio corresponden a la Formación Chango Real que fue definida por Turner (1962) como un granito gris biotítico, que intruye a las metamorfitas de la Formación Loma Corral. Lazarte (1992) redefine a esta formación como un ortogneis granítico pre-tectónico de posible edad cambro-ordovícico. En algunos sectores, la deformación es tan intensa que presenta características de gneis milonítico.

En la sierra de Culampajá también aflora el granito Papachacra definido por García *et al.* (1981) que intruye a las rocas de la Formación Loma Corral y Chango Real, y se divide en dos subunidades: El stock Altohuasi y El Portezuelo.

El granito Papachacra es de composición sienita monzogranítica, postectónica, leucocrática de grano medio a grueso. Es de color rosado y no presenta deformación. Geoquímicamente es de tipo calcoalcalino, peraluminoso, muy evolucionado y con tendencia peralcalina. Se le asigna una edad devónico-carbonífero de acuerdo a correlaciones realizadas con otros cuerpos de similares características de Sierras Pampeanas (Lazarte, 1994).

En discordancia, sobre las rocas metamórficas y granitoides, se apoya una secuencia sedimentaria con intercalaciones de rocas volcánicas del Mioceno-Plioceno (Turner, 1962). Este conjunto de unidades se denominan Grupo El Bolsón, el cual está constituido por las Formaciones El Morterito, El Áspero y El Cajón. De éstas, solo la Formación el Cajón aflora hacia el este de la zona de estudio.

La Formación El Cajón (Turner, 1962) está constituida por areniscas y tobas de edad miocena superior-pliocena (Parra y Morales, 2003).

El cuaternario de la región está representado por depósitos modernos conglomerádicos aluviales y sedimentos arenosos eólicos.

La estructura regional de la zona se caracteriza por presentar un fallamiento inverso lítrico que generó un sistema de montañas en bloques característico de Sierras Pampeanas (Gonzalez Bonorino, 1950). Los juegos de fracturas se habrían generado principalmente durante la Orogénia Ándica. Son importantes las fallas de rumbo NNE-SSO que ponen en contacto rocas terciarias con el basamento cristalino, levantando la Sierra de Culampajá. También existen megafracturas de rumbo ENE-OSO en la zona de La Alumbreira y fracturas de orientación NNO-SSE a submeridianas, que coinciden con el rumbo del lineamiento Corral Quemado.

Sin embargo, los rasgos estructurales más sobresalientes del área de estudio lo constituyen lineamientos de rumbo aproximado N-S y particularmente, una zona de cizalla de orientación general NO-SE que generó una intensa deformación en el granito Chango Real. La deformación se considera cataclisis masiva, ampliamente distribuida, con paso gradual a franjas milonitizadas orientadas al NNO (Lazarte y Guidi, 1998).

#### GEOLOGÍA LOCAL

La mineralización del área de estudio ocurre en el faldeo oriental de la Sierra de Culampajá. La roca de caja de las vetas auríferas es el granito Chango Real. Su composición es monzogranítica a granodiorítica, con variaciones tonalíticas. Es una roca de color gris claro y grano grueso a medio. Está constituida principalmente por plagioclasa (labradorita), cuarzo, ortosa, microclino, biotita, apatito, circón, ilmenita, titanita y rutilo. Esta roca tiene una foliación milonítica muy marcada en algunos sectores, principalmente en los afloramientos que se encuentran dentro del lineamiento Corral Quemado. Presenta una facies equigranular de mayor extensión y una porfírica con desarrollo de fenocristales de microclino. De acuerdo a sus características geoquímicas este granito se clasifica como calcoalcalino y peraluminoso.

El rasgo estructural más sobresaliente del área de estudio lo constituye una zona de

cizalla de orientación general NO-SE que generó una intensa deformación en el granito Chango Real durante un importante evento tectónico deformacional (fase Oclóyica del Ciclo Famatiniano) desarrollado entre el Cámbrico Superior y el Devónico en el NO de Sierras Pampeanas (Lazarte 1992). Esto dio como resultado una roca con textura porfiroclástica constituida por porfiroclastos de microclino y plagioclasa de hasta 1 cm (en ocasiones mayores), rodeados de una matriz cuarzo – micácea con desarrollo de foliación milonítica. Los cristales de plagioclasa y feldespato potásico (microclino y ortosa) poseen gran desarrollo, hábito prismático y forma anhedral a subhedral siendo muy común el desarrollo de texturas pertíticas y mirmequíticas. Estos minerales se comportan de manera frágil frente al esfuerzo deformacional ya que presentan frecuentemente fracturas y efectos de tracción y desgarro en los bordes. Sin embargo, se observan evidencias de deformación en estado plástico dadas por la presencia de microtexturas dúctiles como las observadas en las uniones entre los granos de cuarzo. Estos presentan contactos saturados dando lugar a formas poligonales y puntos triples con juntas a 120°, de lo que se interpreta al menos una etapa de recristalización primaria, típica de microestructuras formadas por deformación dúctil (Martino, 2003). Las láminas de biotita se hallan orientadas en una dirección formando bandas de esquistosidad o foliación milonítica y se encuentran intensamente flexuradas. El cuarzo en toda la roca es policristalino y se presenta en forma de grandes mosaicos de forma lenticular formados por disolución por presión y recristalización. Entre las bandas de cuarzo recristalizadas y los bordes de los porfiroclastos es común el desarrollo de delgadas bandas con textura de mortero.

Al sur del área de estudio aflora el stock Altohuasi definido por Velazco Robles (1982) como un granito rosado que intruye a las rocas de la Formación Loma Corral y al granito Chango Real. Es un granitoide de composición sienita a monzogranito, leucocrático, de color gris claro a rosa pálido.

Tiene tamaño de grano medio a grueso y textura porfídica. Presenta fenocristales de feldespato potásico peritítico, cuarzo y plagioclasa (albita – oligoclasa) y una matriz constituida por feldespato potásico, cuarzo, biotita y muscovita con cantidades menores de topacio, epidoto, circón y fluorita.

#### MANIFESTACIONES MINERALIZADAS

Las principales manifestaciones mineralizadas del área de estudio que se han diferenciado corresponden a: Cabra Caja, Cástulo, Fabio, La Alumbra La Sarna I, La Sarna II, La Sarna III, La Rosario, La Chiruzza, Paredes, Viento Blanco, Gutiérrez, Tajo Largo, El Moradito y El Ingenio (Ávila *et al.*, 1999). Sin embargo en este trabajo nos referiremos a tres de estas manifestaciones: La Rosario Tajo Largo y La Alumbra, ya que son las más relevantes y las mejor preservadas (figura 1).

Las vetas de cuarzo, se encuentran emplazadas en el granito Chango Real por medio de fracturas tensionales (Ávila y Velazco Robles, 1983) de rumbo predominantemente E-O con inclinaciones subverticales. Sin embargo, se observaron dos sistemas de vetillas de cuarzo de diferente rumbo en la ZONA DE TAJO LARGO N55°E con inclinaciones de 85° NE, y N40°O con inclinaciones subverticales en la ZONA DE LA ROSARIO.

Las vetas presentan escasa potencia, desde 0,1 m hasta 1 m. Presentan color blanquecino, en algunos casos levemente ahumado y en general poseen impregnaciones de óxidos de hierro que les confieren una tonalidad rojiza a pardo anaranjada. Los minerales opacos (sulfuros y óxidos) aparecen concentrados en pequeños «bolsones» distribuidos irregularmente dentro de las vetas. En general son vetas de textura maciza, sin ramificaciones, aunque en algunas zonas se diferencian pequeñas zonas de venilleo tipo *stockwork*.

La mineralogía de estas vetas está constituida por cuarzo como principal mineral de ganga acompañado de pirita y calcopirita que constituyen los sulfuros de origen prima-

rio. Se observaron minerales secundarios como covelina reemplazando a calcopirita, como así también goethita, hematita, azurita y malaquita como productos de oxidación de pirita y calcopirita. La presencia de oro no se pudo determinar microscópicamente en este trabajo, solo a través de los análisis químicos en las vetas y las salvandas de las mismas. Sin embargo existen numerosos antecedentes que mencionan oro nativo en chispas en las vetas, (Velazco Robles, 1982 y Lazarte y Avila, 2011).

#### ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal que afecta a la roca de caja granítica es irregular y discontinua. Presenta su mayor intensidad en las salvandas de las vetas y va disminuyendo hacia las zonas más alejadas de las mismas. Si bien la zona de alteración hidrotermal en general no es homogénea, y su visibilidad, tanto en los afloramientos, como en interior de mina se dificulta inclusive dentro de una misma zona, puede decirse que la misma varía desde unos cuantos centímetros a aproximadamente 1 m de espesor.

En la figura 2 a y b se presenta una sección delgada donde se observa una muestra tomada en un sector sin indicios de alteración hidrotermal (Gi20).

A continuación se describen las alteraciones hidrotermales observadas en la roca de caja granítica para las diferentes zonas mineralizadas ordenadas de norte a sur. La

asociación de los minerales de alteración pueden observarse en la tabla 1.

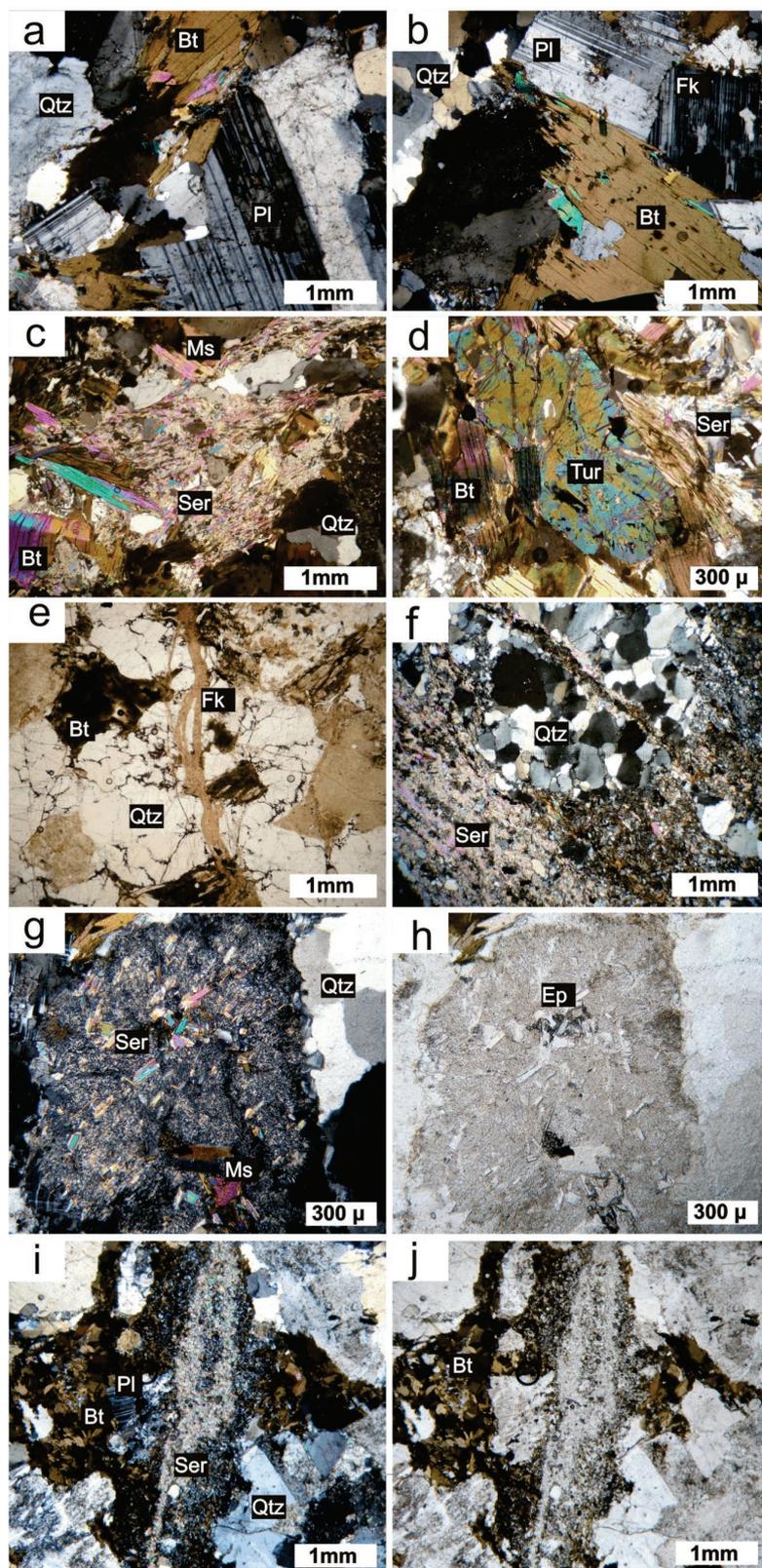
*La Rosario.*— En esta área predomina la alteración sericitica penetrante de intensidad fuerte, que afecta tanto a los feldespatos como a las biotitas de la roca de caja granítica. Además se observa abundante muscovita secundaria de grano fino a medio, y turmalina anhedral, asociados a la sericitización (figura 2 c y d).

*Tajo Largo.*— En esta área la roca de caja granítica presenta abundante sericitización de intensidad fuerte. La sericita está acompañada de cristales anhedrales de epidota que alteran principalmente a las plagioclasas. Los cristales de biotita presentan una leve cloritización. También se observó feldespatización evidenciada por la presencia de feldespato potásico en venillas que atraviesan a los minerales primarios de la roca (figura 2 e y f).

*La Alumbraera.*— En esta zona también predomina la sericitización. Esta alteración es penetrativa de intensidad moderada a fuerte y afecta a los minerales primarios de la roca. Sin embargo, en algunos casos la sericitización es de tipo selectiva alterando principalmente a los cristales de plagioclasa. En ocasiones se observan pequeños cristales anhedrales de epidota alterando a las plagioclasas y cloritización en las biotitas (figura 2 g y h).

**Tabla 1.** Ubicación y descripción de la mineralogía de alteración de las muestras provenientes de las distintas zonas mineralizadas utilizadas para los diagramas de isoconas.

Muestras	Ubicación	Asociaciones de alteración
Gi7	Granito en La Rosario	Sericita-Muscovita-cuarzo-turmalina-clorita
Gi10	Granito en Tajo Largo	Sericita-Feldespato potásico- epidota-clorita
Gi18	Granito en La Alumbraera	Sericita-muscovita-epidoto-clorita
Qa3	Granito en La Alumbraera	Sericita-clorita-muscovita-epidoto-clorita
Mp15	Granito en Lomas del Pachao	Sericita-epidoto-clorita



**Figura 2.** Fotomicrografías mostrando la roca de caja no alterada y las alteraciones hidrotermales en las diferentes áreas mineralizadas: a) y b) Gi20 roca de caja no alterada. Nicols cruzados. c) Gi7 alteración sericitica y muscovita secundaria en La Rosario. Nicols cruzados y d) Gi7 alteración sericitica con turmalina hidrotermal. Nicols cruzados. e) Gi10 feldspatización en venillas en la zona de Tajo Largo. Nicols paralelos. f) Gi10 alteración sericitica en Tajo Largo. Nicols cruzados. g) Qa3 alteración sericitica en la zona de La Alumbreira. Nicols cruzados y h) idem e nicols paralelos. i) Mp15 alteración sericitica en las Lomas del Pachao. Nicols cruzados. j) idem nicols paralelos. Bt= Biotita, Fk= Feldspato potásico (microclino), Ser= Sericita, Ms= muscovita, Qtz= Cuarzo, Pl= Plagioclasa, Ep= epidota, Tur= Turmalina.

*Lomas del Pachao.*— predomina la alteración sericítica selectiva y en venillas de intensidad débil a moderada. Afecta principalmente a los cristales de plagioclasa y en menor intensidad al feldespato potásico y a la biotita. También hay presencia de epidoto y clorita hidrotermal (figura 2 i y j).

#### GEOQUÍMICA DE LA ALTERACIÓN

Los análisis químicos de las muestras del granito en las áreas de estudio, se realizaron sobre roca total y se analizaron en Acme Labs, Canadá. Los métodos analíticos utilizados fueron fusión con  $\text{LiBO}_2$  seguido de fluorescencia de Rayos X para los óxidos mayoritarios, mientras que para elementos traza se utilizó ICP-MS (Tabla 2).

Se realizó un estudio geoquímico de balance de masas con el objetivo de determinar los cambios químicos sufridos por las rocas durante el proceso de alteración hidrotermal. Para ello se utilizó el método de diagramas de isocona propuesto por Grant (1986). Este método gráfico permite cuantificar las ganancias y pérdidas relativas de los elementos y compuestos químicos durante el proceso de alteración, analizando muestras de roca alterada y una semejante sin evidencias de alteración. Luego se graficaron los datos químicos obtenidos en un diagrama binario donde se proyectaron los valores de los distintos elementos y compuestos químicos de la roca sin alteración en las abscisas y de la roca alterada en las ordenadas (figura 3).

Para trazar las rectas isoconas se consideró al aluminio como elemento inmóvil ya que, debido a su baja solubilidad, se lo considera como un elemento prácticamente inerte en los estudios de balance de masas (Grant, 1986) y constituye en este sentido un elemento de buena calidad para esbozar, incluso por sí mismo, la recta isocona a través del origen. Teniendo en cuenta esto, se consideraron algunos elementos que se comportan de manera inmóvil ya que presentan una muy buena correlación lineal con el aluminio. Estos elementos y/o compuestos químicos variaron de una muestra a otra, aunque

algunos son comunes a todas como por ejemplo  $\text{SiO}_2$ . A continuación se mencionan los elementos y/o compuestos (además de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que se comportan forma inmóvil para cada muestra: Mp15:  $\text{SiO}_2$ , Zr, Hf y Ta; Gi10: a los elementos mencionados para Mp15 se suma el Cs y Th; Gi7:  $\text{SiO}_2$ , Ga, Ta, Th y Ba; Gi18:  $\text{SiO}_2$ , Zr, Ga, Cs, Hf, Ta y QA3:  $\text{SiO}_2$ , MnO, Th y Ga.

Se utilizó la fórmula propuesta por Grant (1986) para calcular la variación de concentración de cada elemento y si esta ecuación se multiplica por 100 obtenemos la variación porcentual de cada elemento:

$$\text{Variación \%} = ((m \cdot (C_{ai}/C_{oi})) - 1) \cdot 100$$

Donde **m** representa la relación de masa entre la roca alterada y la no alterada (pendiente de la línea isocona),  $C_{ai}$  es la concentración del elemento de la roca alterada y  $C_{oi}$  es la concentración del elemento de la roca sin alterar o protolito.

Se tomaron muestras de la roca de caja alterada en diferentes zonas mineralizadas: La Rosario (Gi7), Tajo Largo (Gi10) y La Alumbra (Gi18 y Qa3). Cabe destacar, que también se muestreó la zona sur del área de estudio conocida como Lomas del Pachao, donde no hay indicios de mineralización aurífera (Mp15) con el objetivo de determinar si la influencia de los fluidos se restringe solo a las áreas con mineralización. En todos los casos las muestras analizadas corresponden al granito Chango Real. Las muestras alteradas se compararon con una muestra de roca no alterada (Gi20) tomada en la zona de La Alumbra a una distancia aproximada de 1 km de las labores.

En los diagramas de isocona de la figura 3 puede observarse que ciertos elementos y compuestos químicos se proyectan por encima de la recta, lo que indica que los mismos fueron añadidos enriqueciendo a la roca durante el proceso de alteración hidrotermal. Mientras que por otro lado, los que se ubican por debajo de la línea disminuyeron su contenido en la roca alterada generando un empobrecimiento durante la alteración hidrotermal.

**Tabla 2.** Análisis químicos de elementos mayoritarios, minoritarios (%), y elementos traza (ppm) del granito Chango Real.

Granito Chango Real						
Muestra	Gi20	Mp15	Gi18	Qa3	Gi10	Gi7
SiO <sub>2</sub>	63	66,5	70,5	62,3	67,4	62,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,3	14,71	13,74	15,58	13,73	16,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	7,74	5,13	4,70	6,76	5,25	7,41
CaO	3,21	1,84	1,62	2,84	0,84	0,49
MgO	2,27	1,63	1,78	2,23	1,58	0,49
Na <sub>2</sub> O	2,92	3,94	3,63	2,93	3,56	1,21
K <sub>2</sub> O	3,26	3,01	2,39	3,99	4,09	5,23
MnO	0,11	0,13	0,08	0,11	0,09	0,13
TiO <sub>2</sub>	1,06	0,76	0,59	1,04	0,82	0,83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24	0,18	0,07	0,33	0,23	0,08
LOI	0,64	1,06	0,90	0,91	1,97	2,56
Total	99,82	98,93	100,02	99,21	99,60	100,27
Ba	538	516	389	635	517	562
Be	1	3	2	2	2	3
Co	18,4	14,01	11,1	17,4	12,1	19,8
Cs	6,2	1,50	5,6	9,8	6,8	10,4
Ga	21,8	17,90	19,6	23,1	16,5	24,8
Hf	8,6	9,4	10	10,8	8,2	6,9
Nb	18,5	15,2	20,8	19,2	15,2	15,5
Rb	158,5	89,9	126,6	187,8	166,2	196,6
Sn	2	4	3	4	4	4
Sr	162	180,9	166,8	158,5	82,8	71,7
Ta	1,1	1,2	1,5	1,5	1,2	1
Th	17,1	15,8	24,8	14,6	16,2	17,6
U	1,2	1,3	2,8	2,9	2,5	3,7
V	126	86	70	118	82	118
W	0,5	2,5	0,8	0,6	2,2	0,9
Zr	338,9	363,2	343,1	430,0	312	246,9
Y	21	32,7	47,3	32,5	34,3	27,4
Mo	0,4	0,5	3	2,1	0,4	0,4
Cu	26,5	12,5	8,8	20,4	4,9	7,2
Pb	3,2	10,8	4,7	12,7	2,1	5,2
Zn	91	92	62	94	63	113
Bi	0,1	0,9	0,3	0,2	0,3	0,1
Au	0,0007	0,0018	0,0041	0,0022	0,0013	0,0025

Los resultados obtenidos muestran que la alteración sericitica es la alteración predominante y está presente en todas las muestras. Esta alteración ha producido pérdidas de Ca y ocasionalmente de Na (acompañadas por pérdidas de Sr) como producto de la parcial destrucción de las plagioclasa (figu-

ra 3). Las ganancias de Na que se observan en las muestras Mp15 y Gi10 podrían deberse, probablemente, a un contenido elevado del componente paragonítico en la sericita.

Un fenómeno observado en todas las muestras es la incipiente pérdida de Fe, que se explica por la desferrización de la biotita

observada en los cortes delgados. Así también, es notoria la pérdida de Mg en las zonas de las Lomas del Pachao y Tajo Largo (muestras Mp15 y Gi10) lo que es esperable ya que este elemento tiende a lixivarse en la zona sericitica. Sin embargo, en la zona de La Rosario (Gi7) se observa adición de Mg, lo que podría explicarse debido a la fijación del Mg en la estructura de la clorita, o bien, por la presencia de turmalina en la asociación de alteración. En las muestras analizadas de la zona de La Alumbraera, el Mg se comporta de forma aparentemente inmóvil.

En este último caso, el resultado obtenido (aparente inmovilización) podría ser el resultado de su movilización y posterior fijación, en forma localizada tanto en la muscovita como en la clorita, ya que estos minerales pueden incorporarlo en su estructura (figura 3).

En cuanto a las ganancias, el único óxido mayoritario en el que se observa adición es el K. En la muestra Gi10 se observa un incremento en K que podría deberse a la presencia de feldespato potásico en venillas. Las ganancias de K en las muestras Qa3 y

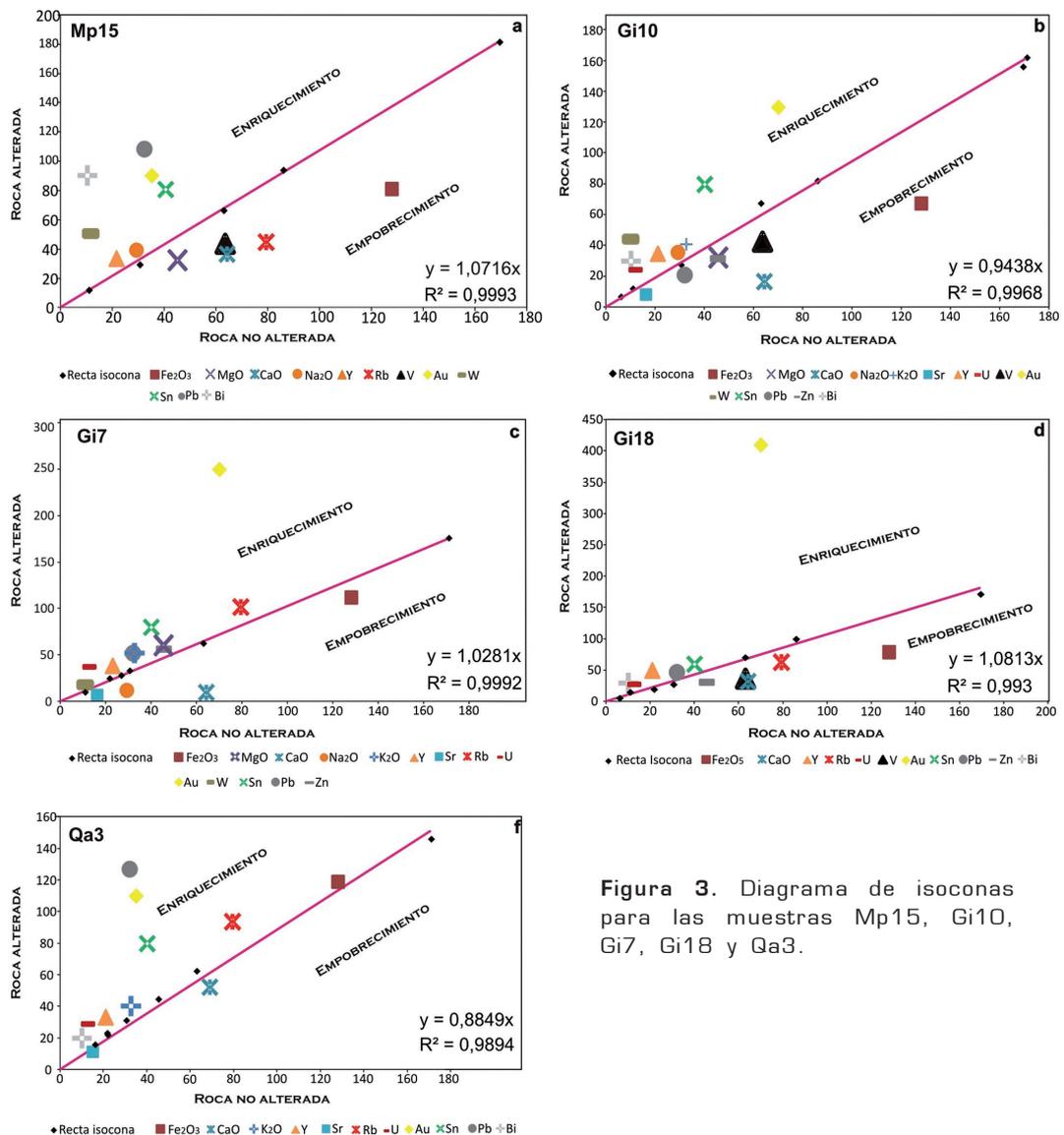
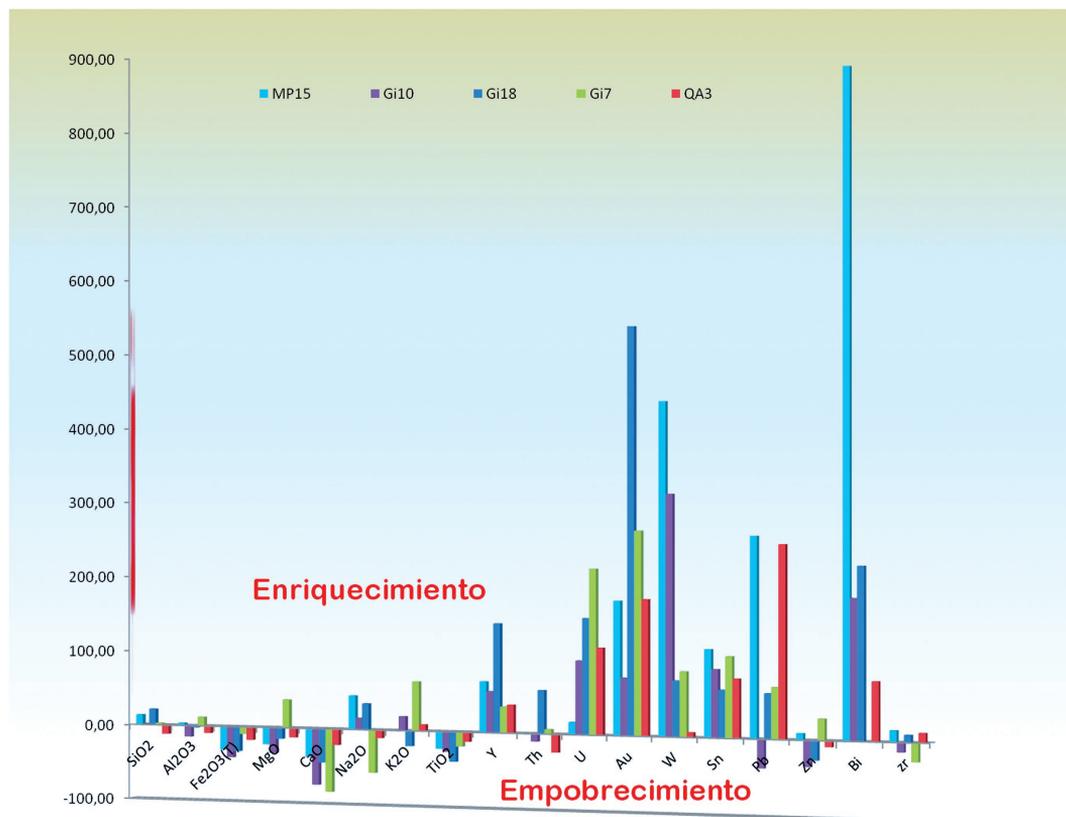


Figura 3. Diagrama de isoconas para las muestras Mp15, Gi10, Gi7, Gi18 y Qa3.



**Figura 4.** Diagrama de barras mostrando las muestras estudiadas con sus respectivas ganancias y pérdidas.

Gi7 podrían explicarse por la presencia de muscovita secundaria (figura 3).

Por otro lado, es importante destacar las ganancias en algunos elementos traza como U e Y. Asimismo, se observa la adición de elementos metálicos como W, Sn, Bi, Au, y Pb. En cuanto a las pérdidas, el V es el único elemento traza en el que se observa una disminución significativa (figura 3).

En la figura 4 se presenta un diagrama de barras donde se representan gráficamente las ganancias y pérdidas de los elementos y/o compuestos químicos de las distintas muestras analizadas, cuyo propósito es visualizar las ganancias y pérdidas de todas las muestras. Se representó también  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y Zr que son los elementos y/o compuestos inmóviles de que son comunes a todas las muestras.

De acuerdo a los cálculos de balance de masas, en la zona de La Alumbra se pro-

dujo el mayor incremento de masa (12%) en la muestra Qa3 durante los procesos de alteración. Sin embargo la muestra Gi18 muestra una considerable pérdida de masa (8%). En la zona de la Rosario, la pérdida de masa registrada es muy baja (3%). En Tajo Largo hubo una ganancia del 6% y en las Lomas del Pachao se registra una pérdida del 7%. Estos porcentajes corresponden a ganancia/pérdida con respecto al protolito no alterado y se calculan teniendo en cuenta la variación porcentual de la masa ( $\text{Ma}\% = 100/\text{m}$ ).

#### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los estudios petrográficos realizados en roca de caja de las vetas de cuarzo aurífero, indican que la alteración hidrotermal de mayor desarrollo en el área de estudio es la sericitización acompañada de feldespaticización localizada con presencia de clorita y

epidota. Esta alteración es de tipo no penetrativa, ya que solo se manifiesta en las intermediaciones de la veta, dejando ciertos volúmenes de roca sin alterar.

De acuerdo a lo observado puede concluirse que la alteración hidrotermal disminuye su intensidad de norte a sur en el área de estudio. Por lo que la zona con mayor grado en cuanto a la intensidad de la alteración hidrotermal, corresponde a La Rosario y disminuye gradualmente hacia la zona de Lomas del Pachao.

El análisis de los cambios químicos producto de la alteración mediante la utilización de los diagramas de isoconas muestra que la alteración sericitica produjo importantes cambios en la geoquímica de la roca de caja granítica.

Los resultados del estudio geoquímico de balance de masas indican pérdidas de Ca e Fe generalizadas en todas las zonas de estudio y ganancias de K en las áreas mineralizadas.

En cuanto a los elementos traza se observa un importante enriquecimiento en Au y de algunos elementos traza como U e Y y metálicos como Pb, Y, U, Bi, W y Sn. En la muestra Mp15 que no corresponde a una zona mineralizada, se observó una moderada ganancia en oro, con respecto a las zonas mineralizadas, lo que indicaría, que la influencia de los fluidos mineralizantes es extensa y no solo se circunscribe a las zonas mineralizadas.

En este estudio no se observó una relación directa entre el grado de alteración y los volúmenes porcentuales de ganancia/pérdida de masa en las muestras analizadas. Estos resultan ser variables e independientes respecto a la intensidad de la alteración.

El enriquecimiento observado en U, Pb, Y, U, Bi, W y Sn resulta inexplicable desde el punto de vista mineralógico y podría deberse al enriquecimiento de estos elementos en la corteza superior lixiviados por los fluidos hidrotermales durante su circulación en las rocas.

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren, que los procesos de alteración hidrotermal en las diferentes áreas analizadas

tuvieron un comportamiento geoquímico similar, con ligeras variaciones en cuanto a ganancias y pérdidas de determinados elementos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza, G. y Toselli, A. 1981: Geología del Noroeste Argentino. Facultad Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Tucumán, publicación especial 1287, San Miguel de Tucumán: 212 p.
- Ávila, J. C. y Velazco Robles, L. 1983. Relevamiento minero de las sierras de Altohuasi y Culampajá, Belén, Catamarca. II Congreso Nacional de Geología Económica. Actas 2: 11-27. San Juan.
- Ávila, J. C. y Lazarte, J. E., 2011. Metallogeny of Culampajá Gold District, Argentina. En: Broekmans, MATM (ed): 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), 17-21.
- García, H., Masabié, A. y Rossello, E. 1981. Contribución a la geología de La Cuesta, Belén, Catamarca. VIII Congreso Geológico Argentino. Actas 4: 833-865, San Luis.
- Gonzalez Bonorino, F. 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 5: 81-110.
- Grant, J. A. 1986. The isocon diagrams-A simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration. Economic Geology 81: 1976- 1982.
- Grosse, P. 2007. Los granitos porfíricos y orbiculares del sector Centro Oriental de la Sierra de Velasco: génesis y significación regional. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (inédito), 285 p. Córdoba.
- Lazarte, J. E. 1992. La Fm. Chango Real (NO de Sierras Pampeanas, República Argentina), ejemplo de magmatismo Paleozoico (Cámbrico?). Diferencias geoquímicas con batolitos ordovícicos. Estudios Geológicos, 48 (5-6): 257-267. Madrid.
- Lazarte, J. E. 1994. Geología y geoquímica del Granito Papachacra (¿Carbonífero?), Sierras Pampeanas, Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 49 (3-4): 337-352.
- Lazarte, J. E. y Guidi, F. 1998. Geología de los granitoides de las sierras de Zapata y Cordón de los Colorados. Revista del Instituto de Geología y Minería de Jujuy, 12(1): 17-34.
- Martino, R. D. 2003. Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: Una reseña general. Revista de la Asociación Geológica Argentina 58 (4): 549-571.
- Parra, L. E. y Morales, J. A. 2003. Descripción e interpretación de la columna estratigráfica tipo de la serie vulcano-sedimentaria neógena del Valle del Cajón (Catamarca, Argentina). Geogaceta 33: 55-58.

- Ramos, V. A. 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: Caminos, R. (ed.) Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 29: 41-96, Buenos Aires.
- Turner, J. C. 1962. Estratigrafía de la región al naciente de Laguna Blanca (Catamarca). Revista de la Asociación Geológica Argentina 17: 11-14.
- Velazco Robles 1982. Estudio geológico-económico del sector oriental de las sierras de Altohuasi y Culampajá entre las quebradas La Tranca y La Alumbreira, Belén, Catamarca. Seminario de grado, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, UNT (Inédito) 187pp. Tucumán.