



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL DE DOMEYKO Y DEL  
YACIMIENTO DE COBRE DOS AMIGOS, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN  
EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOLOGÍA**

TOMAS ANTONIO ALMONACID CHAVEZ

PROFESOR GUIA:

SR VICTOR MAKSAEV JURCHUC.

MIEMBROS DE LA COMISION:

SR CARLOS PALACIOS MONASTERIO.  
SR BRIAN TOWNLEY CALLEJAS.  
SR. WALDO VIVALLO SANDOVAL

SANTIAGO DE CHILE  
MAYO 2007

## RESUMEN

La Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko se ubica inmediatamente al este del pueblo homónimo, a unos 40 Km. al sur de la ciudad de Vallenar en la Región de Atacama del árido norte de Chile. La zona de alteración está alargada en sentido norte-sur, con 5,5 Km. de largo, un ancho promedio de 1,5 Km. y una altitud media de 1.100 m sobre el nivel del mar. En su porción sur se ubica el pórfido de cobre Dos Amigos (coordenadas UTM: 317.000E y 6.794.000N), actualmente explotado por la empresa CEMIN, mientras en la parte norte de la misma zona alterada se ubica el pórfido de cobre Tricolor (mina actualmente inactiva); ambos centros de mineralización cuprífera se localizan en respectivos stocks de pórfido diorítico y granodiorítico. El emplazamiento de estos dos stocks están controlados estructuralmente por la falla Dos Amigos que es una falla subsidiaria del Sistema de Falla de Atacama. El límite occidental de la zona de alteración lo constituye el contacto tajante con un cuerpo intrusivo equigranular de grano medio, inalterado, de composición granodiorítica a diorítica. Este constituye un batolito que aflora entre la localidad de Domeyko y la Cuesta de Pajonales (Cordón Las Bandurrias) y que ha dado edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en biotita de  $96,9 \pm 0,9$  y  $94,8 \pm 1,0$  Ma (Cenomaniano). El yacimiento Dos Amigos es un pórfido cuprífero con contenido menor de oro, ligado a un pórfido tonalítico que ha dado edades U-Pb en circón (LAM-ICP-MS) de  $106,1 \pm 3,5$  y  $104,0 \pm 3,5$  Ma (Albiano), por su parte el pórfido granodiorítico de la mina Tricolor dio una edad U-Pb en circón de  $108,5 \pm 3,4$  Ma (Albiano). Los dos stocks porfíricos tienen alteración potásica (biotita-magnetita) y están rodeados de un halo de alteración cuarzo-sericítica  $\pm$  arcillas desarrollado principalmente en rocas volcánicas del Cretácico Inferior (Grupo Bandurrias) y que hacia el este da paso a una faja de alteración propilitica que afecta a las rocas volcánicas. Además, al noreste del rajo de la mina Dos Amigos aflora una faja norte-sur de rocas con alteración de sílice-sericita-alunita-pirofilita que representa una sobreimposición de alteración argílica avanzada a las alteraciones preexistentes. Todas las rocas alteradas en superficie muestran comúnmente argilización supérgena, lixiviación y oxidación, con frecuentes pátinas de limonitas y hematita en fracturas y localmente en venillas lixiviadas o en la matriz de brechas hidrotermales. La mineralización hipógena asociada al sistema porfírico se presenta como stockwork y diseminada (principalmente en profundidad); representa un ambiente temprano de alta temperatura y fuertemente oxidante (calcopirita-bornita-magnetita) que evolucionó hasta una etapa tardía de alta sulfuración y menor temperatura (calcopirita-enargita-galena). La zona de enriquecimiento supérgeno de cobre con calcosina y covelina tiene 30m de potencia media y se asocia a los núcleos de alteración potásica y a la brecha hidrotermal Marisol.

El estudio preliminar de inclusiones fluidas en vetillas de cuarzo permitió definir dos poblaciones: inclusiones presentes en vetillas de cuarzo tipo B tienen temperaturas de homogenización de 350°C a más de 500°C y salinidades variables desde 10% hasta 48% NaCl eq., mientras que inclusiones fluidas en vetillas de cuarzo tipo D tienen temperaturas de homogenización entre 280°-350°C y salinidad de 5% a 15% NaCl eq.

Se concluye que la zona de Alteración de Domeyko corresponde a un sistema porfírico de cobre con valores subordinados de oro de fines del Cretácico Inferior y forma parte de la denominada "Faja Pacífica de pórfidos cupríferos y desarrollos hidrotermales" de la que también forma parte el pórfido de Cu-Au de Andacollo en la Región de Coquimbo.

Nada en el mundo sustituye a la constancia. EL TALENTO no la sustituye, pues nada es tan corriente como los inteligentes frustrados.

EL GENIO tampoco, ya que resulta ser típico el caso de los genios ignorados.

Ni siquiera LA EDUCACIÓN sustituye a la constancia, pues el mundo esta lleno de fracasados bien educados.

Solamente LA CONSTANCIA Y LA DECISIÓN lo consiguen todo

Anónimo

A MIS PADRES, Antonio Y Ana.

MI ESPOSA Lourdes.

MIS HIJOS Nohelly, Melany y Antonio Jr.

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue posible gracias al Sr. Víctor Maksaev por su apoyo incondicional, en la interpretación, correcciones y financiamiento del presente trabajo de tesis. Mismo que se realiza dentro del contexto de un proyecto de investigación de la metalogénesis de pórfidos cretácicos en la Cordillera de la Costa de las Regiones de Atacama y Coquimbo (Proyecto Fondecyt N° 1040492 de los profesores Víctor Maksaev y Francisco Munizaga).

Hago extensivo mis agradecimientos a la empresa Minera Peñoles de Perú S.A., especialmente al Subdirector de Exploraciones Internacionales Sr. Víctor De la Garza y al Gerente de Exploraciones en Perú, Sr. Felipe Ortigoza C; mediante ellos la empresa en mención financió mis estudios de Magíster en la Universidad de Chile. Así mismo agradezco a los geólogos Gaspar Olín, Carlos Altamirano, por su apoyo incondicional y a todos mis compañeros de trabajo como Víctor, Miguel y principalmente Giancarlo que me ayudo con la digitalización y edición de los planos y figuras.

Expreso mis agradecimientos a la empresa CEMIN que explota la Mina Dos Amigos, especialmente al gerente Sr. Dagoberto Ibaceta y el administrador Sr. Amilcar Álvarez quienes me permitieron ocupar sus instalaciones durante los trabajos de campo.

También agradezco a los profesores Brian Townley, Carlos Palacios y Waldo Vivallo integrantes de la comisión examinadora por sus aportes y correcciones, los que incrementaron notablemente la calidad de este trabajo.

También a todas las personas de la Universidad De Chile que contribuyeron a que mi estadía en Chile sea placentera especialmente la Sra. Cristina Maureira, Sra. María Rosa Rocco y a Luís Alfaro por facilitarme en todo momento los tesoros que custodia, los libros. Como olvidarme de todo mis compañeros de postgrado Felipe, Alfonso, Ariel, Lizette, Caldera, Galáz, Joaquín y todos los demás cuya mención sería tarea de nunca acabar, gracias compañeros.

Finalmente agradezco a mi esposa y mis hijos por tener la paciencia y el coraje de soportar mi ausencia en la casa durante el tiempo que duraron mis estudios de postgrado, gracias familia mía.

# INDICE

Página

RESUMEN	
<b>I. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
I.1 GENERALIDADES	
I.1.1 Ubicación y Accesos	
I.1.2 Relieve y Clima	
I.1.3 Infraestructura	
I.2 ESTUDIOS ANTERIORES	
I.3 OBJETIVOS	
I.4 HIPOTESIS DE TRABAJO	
I.5 METODOLOGIA	
<b>II. MARCO GEOLOGICO</b>	<b>9</b>
II.1 MARCO GEOTECTONICO	
II.2 CONTEXTO METALOGENICO	
II.3 GEOLOGIA REGIONAL	
II.3.1 Rocas Estratificadas	
II.3.2 Rocas intrusivas	
II.4 ESTRUCTURA REGIONAL	
II.5 GEOLOGIA DE LA ZONA DE ALTERACIÓN DE DOMEYKO	
II.5.1 Litología	
II.5.1.1 Rocas Estratificadas	
II.5.1.2 Rocas intrusivas	
<b>III. GEOCRONOLOGIA</b>	<b>39</b>
<b>IV. ESTRUCTURAS EN LA ZONA DE ALTERACIÓN DE DOMEYKO</b>	<b>50</b>

<b>V.</b>	<b>ALTERACIÓN HIDROTHERMAL</b>	<b>55</b>
	V.1 ALTERACIÓN POTÁSICA Y PROPILÍTICA INICIAL	
	V.2 ALTERACION FILICA	
	V.3 ALTERACIÓN ARGÍLICA AVANZADA	
	V.4 ALTERACIÓN SUPÉRGENA	
	V.5 VETILLAS ASOCIADAS	
<b>VI.</b>	<b>MINERALIZACIÓN</b>	<b>67</b>
	VI.1 ZONA DE SULFUROS HIPÓGENOS	
	VI.2 ZONA DE SULFUROS SUPERGENOS	
	VI.3 ZONA DE LIXIVIACIÓN	
	VI.4 ZONA DE OXIDOS	
<b>VII</b>	<b>MICROTHERMOMETRIA DE INCLUSIONES FLUIDAS</b>	<b>77</b>
	VII.1 FUNDAMENTOS	
	VII.2 METODOLOGIA	
	VII.3 RESULTADOS	
<b>VIII.</b>	<b>DISCUSION DEL MODELO PARA LA ZONA ALTERADA DE DOMEYKO</b>	<b>84</b>
<b>IX.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>95</b>
<b>X.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>99</b>

## FIGURAS

Figura 1	Plano de Ubicación geográfica	Escala gráfica
Figura 2	Ubicación de Zonas en Zona Domeyko	Escala gráfica
Figura 3	Plano Fallas Regionales	Escala gráfica
Figura 4	Franjas Metalogénicas en el Cretácico	Escala gráfica
Figura 5	Franjas Metalogénicas de Pórfidos-Chile	Escala gráfica
Figura 6	Plano Geología Regional	Escala gráfica
Figura 7	Plano Morfológico- Depresión Central	Escala gráfica
Figura 8	Plano Geológico- Estructuras Zona Alterada de Domeyko	Escala gráfica
Figura 9	Diagrama de Winchester & Fluid (1977) rocas volcánicas del Grupo Bandurrias.	
Figura 10	Diagrama Spider con elementos Traza normalizados según McDonough. Rocas volcánicas- Bandurrias.	
Figura 11	Diagrama de Winchester & Floyd (1977) rocas porfiríticas.	
Figura 12	Diagrama Spider con elementos Traza normalizados según McDonough-Rocas porfiríticas.	
Figura 13	Diagrama AQP-Streckeisen. Rocas intrusivas (Batolito Cordón Las Bandurrias)	
Figura 14	Diagrama Spider con elementos Traza normalizados según McDonoug. Rocas intrusivas (Batolito Cordón Las Bandurrias)	
Figura 15	Diagrama Irving y Barajar, 1971 con resultados multielementos.	
Figura 16	Diagrama en barras para datación U-Pb-pórfidos.	
Figura 17	Diagrama en barras para datación U-Pb-Batolito Cordón las Bandurrias.	
Figura 18	Diagrama con espectros de edades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , pórfido Tricolor-sericita y Biotitas.	
Figura 19	Diagrama con espectros de edades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , Dos Amigos-Biotita	
Figura 20	Diagrama con espectros de edades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , Brecha Marisol- sericita.	
Figura 21	Diagrama con espectros de edades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , Tricolor con milonitas-sericita-Falla Dos Amigos,	
Figura 22	Diagrama con espectros de edades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , Batolito Cordón las Bandurrias.	

- Figura 23 Diagrama compósito edades, zona alterada de Domeyko.
- Figura 24 Diagrama en roseta con sistemas de fallas.
- Figura 25 Diagrama Compósito con vetillas de cuarzo Tipo A, B Y D.
- Figura 26 Diagrama mostrando Sistema Riedel-Paleoesfuerzos.
- Figura 27 Diagrama con Falla Dos Amigos-Sinistral- Diagrama de paleoesfuerzos.
- Figura 28 Plano de Alteraciones de Zona Alterada Domeyko.
- Figura 29 Sección Geológica Transversal-Brecha Marisol
- Figura 30 Diagrama Fe-Cu-S-O de Witney et al.1985.
- Figura 31 Secuencia paragenética para la Zona de Alteración de Domeyko.
- Figura 32 Clasificación de Inclusiones fluidas según Nash y Theodore (1971)
- Figura 33 Histograma de temperatura de Homogenización en vetillas tipo D
- Figura 34 Histograma de temperatura de Homogenización en vetillas tipo B
- Figura 35 Temperatura de Homogenización versus Salinidad.
- Figura 36 Sección Geológica con dataciones- Zona Hidrotermal Domeyko.
- Figura 37 Modelo General de Alteración Hidrotermal de pórfidos cupríferos.
- Figura 38 Modelo geológico Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko.

## FOTOS

- Foto 1 Textura porfirítica- Dos Amigos
- Foto 2 Granodiorita Batolito cordón las Bandurrias.
- Foto 3 Sistemas de Fallas Dos Amigos Dos Amigos.
- Foto 4 Alteración potásica.
- Foto 5 Alteración Propilítica.
- Foto 6 Alteración cuarzo-sericita
- Foto 7 Alteración cuarzo-sericita-caolín
- Foto 8 Brecha de turmalina en rosetas, con alteración cuarzo-sericita,
- Foto 9 Brecha de turmalina con fragmentos volcánicos- Alteración fílica.
- Foto 10 Fracturas rellenadas con alunita.
- Foto 11 Vetilla de cuarzo Tipo A y B, Vetillas Tipo M-Alteración potásica.
- Foto 12 Vetilla de cuarzo Tipo A atravesada por vetilla tipo B.
- Foto 13 Rajo Dos Amigos con dos tipos de Alteración Hidrotermal.
- Foto 14 Zonación vertical de mineralización supérgena y sulfuros hipógenos.
- Foto 15 Calcopirita y magnetita hipógena.



Foto 16	Calcopirita-magnetita-bornita
Foto 17	Textura de exolución pirita-calcopirita.
Foto 18	Calcocina reemplazando calcopirita.
Foto 19	Hematita reemplazando pirita
Foto 20	Sombrero de hierro (gossan) en Dos Amigos.
Foto 21	Atacamita rodeando pirita.
Foto 22	Inclusiones tipo I
Foto 23	Inclusiones tipo II

## ANEXOS I

Tabla I	Ubicación de muestras en general de muestras Zonas de alteración Hidrotermal de Domeyko
Tabla II	Análisis químico de roca total
Tabla III	Resultados de ensayos químicos ICP
Tabla IV	Tabla con resultados de mediciones de inclusiones fluidas

## ANEXO II

Metodología de datación y resultados de los métodos U-Pb en zircones y Ar.

Gráficos de fechamientos con Isocronas.

### Anexo III

Descripción de secciones pulidas y delgadas

Resultados de análisis con difracción de rayos X

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **I.1 GENERALIDADES**

El estudio de la zona de alteración hidrotermal de Domeyko en la árida Región de Atacama del norte de Chile y del yacimiento cuprífero Dos Amigos localizado en ella, surgió de la necesidad de conocer las características y evolución de este sistema mineralizado dentro del contexto de un proyecto de investigación más amplio de la metalogénesis de pórfidos cupríferos cretácicos de la Cordillera de la Costa en las Regiones de Atacama y Coquimbo (Proyecto Fondecyt N° 1040492 de los profesores Victor Makshev y Francisco Munizaga).

Este estudio aporta nuevos antecedentes de la geología, alteración hidrotermal, mineralización, estructura y modelo geológico de los depósitos localizados dentro de la zona estudiada, de la cual solo existía información fragmentaria y dispersa en informes inéditos relativamente antiguos.

#### **I.1.1 Ubicación y Accesos**

La zona de alteración de Domeyko se sitúa inmediatamente al este del pueblo homónimo, en la Cordillera de la Costa de la parte sur de la Región de Atacama, a unos 40 km al sur de la ciudad de Vallenar (Fig. 1). Las coordenadas geográficas de su centro son 28°59' latitud sur y 70° 52' 40" longitud oeste (UTM: 317.000E y 6.794.000N). El sector se localiza en una zona de relieve de suaves lomajes y de altura media 800 m sobre el nivel del mar. La carretera Panamericana (Ruta 5 norte), el ferrocarril y la línea de energía eléctrica se ubican a unos 3 km al oeste del depósito (Fig. 1).



**Figura 1:** Ubicación geográfica Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko (Dos Amigos).

### **I.1.2 Relieve y Clima**

La zona alterada de Domeyko ocurre en un relieve positivo que corresponde a un cordón montañoso de unos 7 km de largo, de altura media 800 metros s.n.m y que alcanza su máxima altura en el cerro Domeyko de elevación 1.243 metros s.n.m. Sin embargo, esta morfología es la excepción del paisaje ya que, dentro de un contexto regional, la zona se ubica dentro de una depresión (Graben de Domeyko) que se sitúa entre dos sistemas montañosos principales (Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes). Esta depresión está rellena por sedimentos que forman diversas terrazas y sedimentos aluviales modernos, que constituyen extensos llanos.

El área es drenada de este a oeste por las quebradas de Algarrobal y Barrancones las que junto a las de Arenosa y Pastos Largos se constituyen en el llamado llano de Las Bandurrias. Todas estas quebradas tienen sus cursos secos y presentan escurrimiento superficial casi nulo.

La zona alterada de Domeyko es árida y desértica. Su clima es del tipo desértico transicional. Existen marcadas diferencias de temperatura entre el día y la noche y también entre las estaciones de invierno y verano. La temperatura media anual es de unos 15 a 17°C, con máximas de 38°C y mínimas de -1 a -2°C. Los días con sol son mayoritarios y lo más frecuente es que las nubes de la costa no alcancen a cubrir el área. El promedio anual de precipitaciones es del orden de 50 a 70 mm. La vegetación es escasa.

### **I.1.3 Infraestructura**

El pueblo de Domeyko se ubica 50 m al este de la Ruta 5 Norte de la Carretera Panamericana. Las ciudades de Vallenar y La Serena se ubican a 50 km al norte y 140 km al sur de la zona de estudio respectivamente. El puerto de Huasco, 99 km hacia el oeste del pueblo de Domeyko que posee una población de unos 3.000 habitantes (Fig. 1).

## I.2 ESTUDIOS ANTERIORES

La zona de alteración hidrotermal de Domeyko ha sido objeto de varios estudios geológicos en el pasado consta de tres áreas principales. La mina Tricolor, Brecha Marisol, Rajo de la mina Dos Amigos (Fig. 2). Entre los años 1962-1964 fue parte de un programa de exploración desarrollado por la Naciones Unidas en el área Tricolor (Fig. 2) (pórfido Cu-Au), donde se realizó un levantamiento geológico, estudios geofísicos de polarización inducida y resistividad, además de 5 sondajes cortos con un total de 626 m perforados. Los resultados obtenidos indicaron sólo una pobre mineralización de cobre ligada a un pórfido y no mostraron existencia de enriquecimiento supergeno significativo.

Posteriormente durante los años 1968 y 1971, la corporación de Fomento de la Producción (CORFO) ejecutó un programa de exploración por sondajes en la zona de Dos Amigos (Pórfido Cu; Fig. 2), que incluyó la perforación de 43 sondajes de diamantina con un total de 5.361 m perforados y 4 sondajes de percusión con un total de 236 m perforados. Los resultados obtenidos revelaron la existencia de un depósito de cobre con una zona de enriquecimiento supergeno de cobre con recursos estimados en 3,5 Mt con 1,2% CuT.

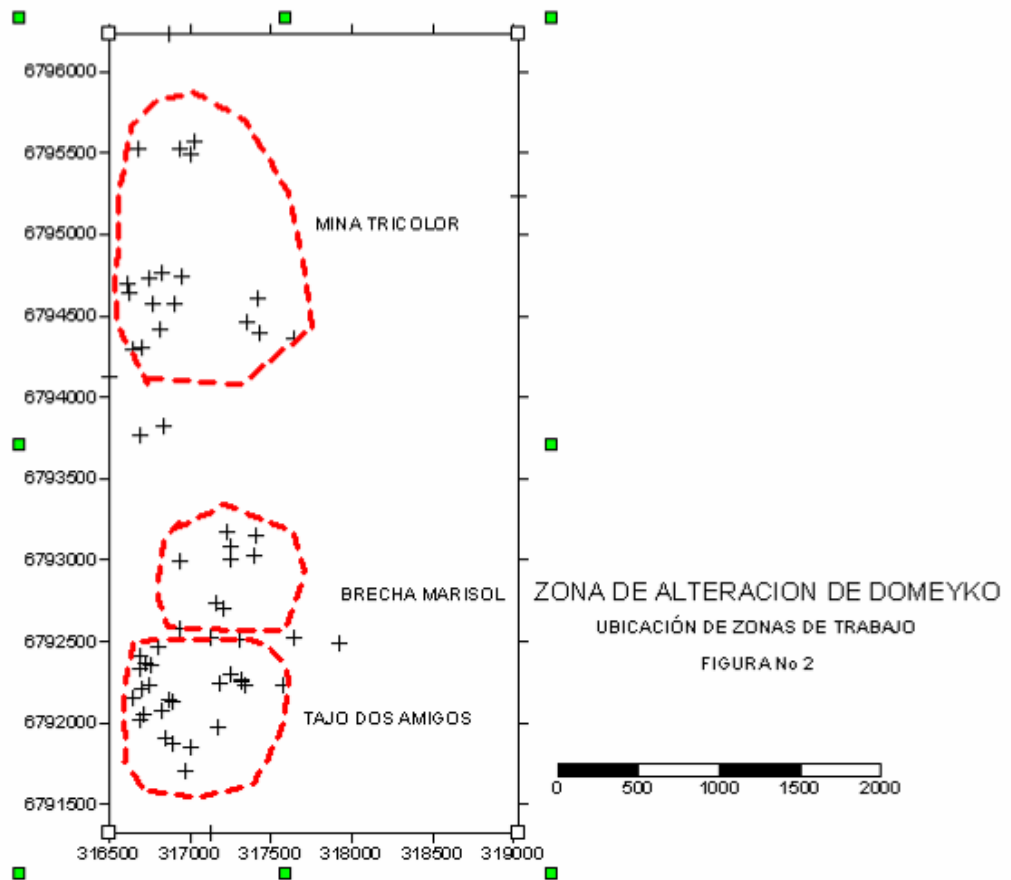
La Empresa Shell Chile, durante los años 1982-1983, desarrolló un programa de exploración en el área Domeyko. Si bien, sus estudios cubrieron toda la franja de rocas alteradas, su énfasis fue obviamente en las zonas con evidencias de mineralización; los resultados obtenidos se conocen sólo parcialmente, por lo que se pueden mencionar solamente los conseguidos en Dos Amigos y Marisol (Fig. 2). Estos indicaron para Dos Amigos recursos del orden de 5 Mt (se desconoce la cantidad de sondajes perforados) con 1,75% CuT y 0,25 g/t Au para mineral con enriquecimiento supergeno y 36 Mt con 0,36% CuT y 0,26 g/t Au para mineral hipógeno. Respecto a Marisol (brecha hidrotermal) la información obtenida de los sondajes indicó que la zona lixiviada puede profundizar hasta los 100 m y que el enriquecimiento supergeno es restringido y con leyes menores de 0,5% Cu. La mineralización hipógena de cobre es de baja ley, normalmente bajo 0,2% Cu con valores de oro variables entre 0.2 y 0.5 g/t Au, pero localmente pueden alcanzar 2 g/t Au.

También durante el año 1982 la compañía Minera Río Huasco realizó una evaluación de los recursos geológicos existentes en el sector de Tricolor, para lo cuál la información obtenida de geología y leyes de superficie y de algunas labores subterráneas fue complementada con la ejecución de 4 sondajes con un total de 307,55 m perforados. Los resultados indicaron recursos del orden de 10 Mt de mineral hipógeno y supergeno con ley indeterminada.

Posteriormente, en el año 1985, la Compañía Minera San Esteban realizó una serie de estudios geológicos con el propósito de definir la factibilidad de un proyecto de desarrollo minero en la zona. Estos incluyeron sondajes, los que centraron en los sectores Dos Amigos y brecha Marisol (Fig. 2) y sus resultados indicaron para el caso de Dos Amigos la existencia de 5,5 Mt de mineral supergeno con una ley media de 1.44% CuT (1,36% Cu soluble) y 0,31 g/t Au para una ley de corte de 0,5% CuT.

En el año 1997, la empresa Placer Dome realizó trabajos de reconocimiento con el objetivo de definir zonas con contenido de mineralización aurífera de interés; a partir de una revisión de detalle de todos los sectores mineralizados conocidos. Esta empresa centró sus estudios en las zona de Mantos del Pacífico (fuera de la zona de estudio), Tricolor, Marisol y Dos Amigos. Los trabajos realizados por Placer Dome, en el Proyecto Domeyko, determinaron que el potencial económico aurífero de la zona es reducido, pero claramente evidenciaron la presencia de sectores con mineralización de oro de baja ley en la zona.

Finalmente, desde el año 1996 la mina Dos Amigos se encuentra en explotación por la compañía CEMIN mediante un rajo abierto, la que ha extraído hasta la fecha 8,5 Mt de mineral con una ley promedio de alrededor de 1% Cu de la zona de enriquecimiento supergeno con calcosina. Mineral que es beneficiado mediante lixiviación en pilas y electro-obtención de cátodos de cobre.



**Figura 2:** Ubicación de las tres zonas de trabajo en la Zona de Alteración de Domeyko.

### I.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es proponer un modelo evolutivo del yacimiento Dos Amigos en la zona de alteración de Domeyko. Con especial énfasis en las relaciones espacio-temporales del emplazamiento del intrusivo porfídico, la alteración hidrotermal y mineralización presente en la Zona de Alteración de Domeyko y del yacimiento cuprífero Dos Amigos.

#### Objetivos Específicos

Caracterización mineralógica-geoquímica de los diferentes tipos de alteración hidrotermal y mineralización existentes en el depósito.

Paragénesis de las asociaciones de minerales con alteración hidrotermal y mineralización.

Determinar, mediante análisis estructural la relación estructural del depósito con los sistemas de fallas regionales descritas en la zona.

Determinar la edad absoluta mediante datación U-Pb en circones, de las rocas intrusivas porfídicas presentes en los sectores Dos Amigos y Tricolor y de minerales silicatados de alteración y biotita del batolito que limita por el oeste a la zona de alteración, mediante los métodos K-Ar o  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .

#### **I.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO**

La información geológica disponible sobre el yacimiento Dos Amigos indicaría a un pórfido cuprífero del Cretácico Inferior, con desarrollo de una zona de enriquecimiento supergeno de cobre. Sin embargo, su afiliación específica como un pórfido Cu-Mo o Cu-Au, u otro es todavía incierta. La hipótesis que planteamos es que este depósito debe ser un símil de Andacollo que ha sido descrito como un pórfido de Cu-Au del Cretácico Inferior (Reyes,1991), pero era necesario la asociación mineralógica-hidrotermal de este depósito en particular para su afiliación definitiva y de esta manera contribuir al conocimiento metalogénico de la Cordillera de la Costa y el potencial de exploración de este tipo de depósitos de la Faja Pacífica, que no constituye actualmente un blanco prioritario de las compañías mineras.

#### **I.5 METODOLOGIA**

La etapa inicial del presente estudio involucró una revisión bibliográfica crítica de los aspectos geológicos generales asociados con el marco geológico de la zona y de antecedentes del sistema mineralizado. Además, de una revisión de trabajos sobre modelos evolutivos de sistemas porfídicos y de yacimientos de óxidos de Fe Cu-Au. Estos dos modelos de ocurrencia mineral comparten algunas características similares espacio-temporales en la Cordillera de la Costa.

#### **Los trabajos de terreno incluyeron las siguientes actividades:**

Levantamiento geológico a escala 1:5.000 del yacimiento Dos Amigos, con énfasis en las relaciones de contacto de las diferentes unidades litológicas, y de zonas de alteración hidrotermal y mineralización.



Se seleccionaron 22 muestras de rocas en las zonas con mineralización de cobre para análisis geoquímicos de Au al fuego más 34 elementos por ICP, 41 muestras para petrografía y mineralogía, de rocas alteradas y/o mineralizadas, 7 muestras de rocas no alteradas a débilmente alteradas para análisis químicos de roca total (elementos mayores), 13 muestras de rocas en zonas alteradas, lixiviación y horizonte de enriquecimiento supergeno para análisis de difracción de rayos X.

Se midieron 200 datos estructurales, en 30 estaciones, teniendo en cuenta fallas (reconocimiento de indicadores cinemáticos), fracturas, vetillas y sus relaciones de corte.

Se colectaron 4 muestras de roca; 2 en el pórfido Dos Amigos, 1 en el pórfido Tricolor y 1 en el intrusivo caja perteneciente al Batolito del Cordón Las Bandurrias para dataciones.

### **Trabajos de laboratorio y procesamiento de la Información.**

Se describieron 32 secciones delgadas y 10 secciones pulidas para caracterizar la alteración hidrotermal y mineralización del sistema.

Se preparó 9 muestras, principalmente con vetillas de cuarzo, para el estudio de inclusiones fluidas. Se realizaron análisis por difracción de rayos-X de arcillas y minerales oxidados de cobre (verdes y negros), presentes en los halos de alteración de las vetillas y zonas de lixiviación, de óxidos y de enriquecimiento supergeno.

El análisis e interpretación estructural mediante el programa Stnet permitió definir la orientación de los paleo-esfuerzos durante el desarrollo del sistema mineralizado.

Los resultados de análisis geoquímicos de 22 muestras de roca analizadas por Au (al fuego) más 34 elementos por ICP en el laboratorio ACME (De los 34 elementos indicamos algunos de los más importantes, Mo, Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Mn, Fe, As, Sb, V, Ca, Mg, Ba, Al, Na, K), se utilizaron para visualizar la asociación geoquímica de los elementos metálicos y no metálicos que caracterizan el yacimiento.

Las 8 muestras analizadas por su contenido de elementos mayores, permiten diferenciar y caracterizar la petroquímica de las rocas presentes en la zona estudiada.

Finalmente se redactó la presente Tesis con diagramas y secciones con la interpretación evolutiva del sistema mineralizado.

## **Limitaciones**

El estudio de inclusiones fluidas es sólo de carácter preliminar, ya que solo fue posible medir escasas inclusiones bifásicas. Además, se encontró inclusiones fluidas con temperaturas superiores a 500°C las que no son medibles por el equipo que se existe en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Los resultados de análisis geoquímico son muy pocos, se usan solo como indicativos de presencia de mineralización (valores referenciales) de Cu y Au.

## **II. MARCO GEOLOGICO**

### **II.1 MARCO GEOTECTÓNICO**

Las características geológicas de Los Andes en el continente Sudamericano, fueron determinadas, por el marco tectónico de margen continental activo con subducción de corteza oceánica bajo la placa sudamericana instaurado desde comienzos del Mesozoico. Se destaca durante el Mesozoico y Cenozoico, el desarrollo de arcos magmáticos volcánico-plutónicos, los que migraron sistemáticamente en tiempo y espacio hacia el interior del continente (hacia el este). La migración del frente magmático ocurrió en forma de saltos discretos siguiendo eventos de deformación compresiva de la corteza continental, de modo, que la deformación tectónica también migró en el tiempo hacia el interior del continente (Boric et al., 1990). Los eventos deformativos a su vez son correlacionables con etapas mayores de reestructuración del sistema de placas (Hervé et al., 1987).

Los Andes Centrales (02°- 45° Lat. S), que son los más relevantes para la metalogénesis chilena, se consideran como un ejemplo clásico de un orógeno "simple" desarrollado en un margen convergente de placas (Dewey y Bird, 1970; James, 1971). Esto es una cadena montañosa no-colisional (sin colisión o acreción de fragmentos continentales o terrenos exóticos), formada sobre un sistema de subducción de larga vida y activo en la actualidad.

En la zona correspondiente a la Cordillera de la Costa del norte de Chile durante el Jurásico y Cretácico Inferior se estableció un arco magmático el que se caracterizó por la efusión de una potente secuencia volcánica calco-alcalina a calco-alcalina rica en potasio (Rogers y Hawkesworth, 1989) con etapas iniciales de afinidades toleíticas (Pichowiak et al., 1994) y extensos batolitos dioríticos a granodioríticos y muchos plutones menores de naturaleza calco-alcalina (Marinovic et al., 1995).

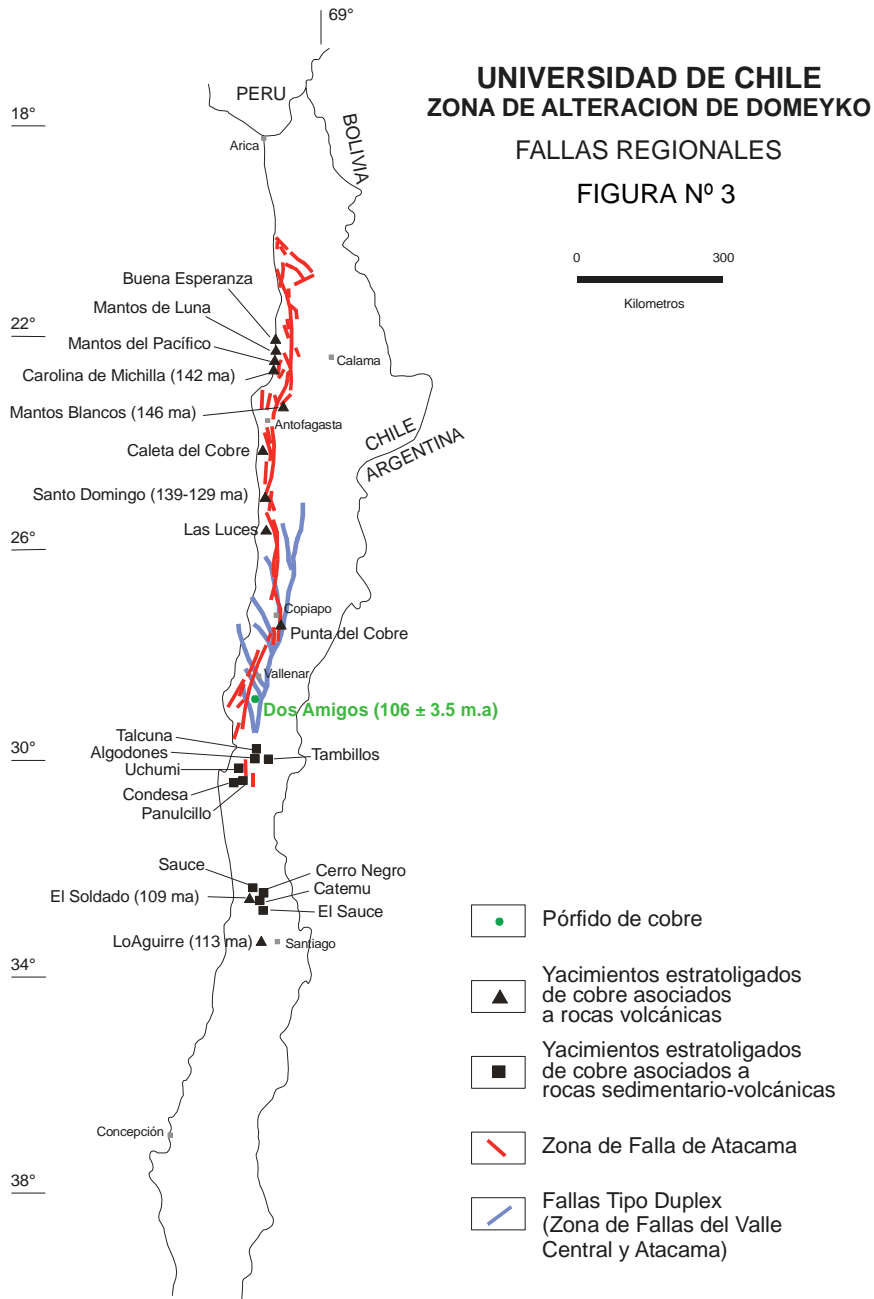
El basamento de este arco está compuesto por rocas metasedimentarias del Devónico a Carbonífero, rocas intrusivas graníticas del Carbonífero a Triásico (Boric et al., 1990). La pila volcánica relacionada al arco del Jurásico a Cretácico Inferior (6.800 a >7.000 m de potencia) está compuesta por andesitas basálticas, basaltos, andesitas y dacitas representadas básicamente por las formaciones La Negra y Aeropuerto en la II Región, formación Bandurrias en la III Región y formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa en la IV Región.

Las rocas intrusivas y volcánicas del Jurásico a Cretácico Inferior en la Cordillera de la Costa del norte de Chile están cortadas por el Sistema de Falla de Atacama (Fig. 3). Este es un sistema de falla mayor que se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa por alrededor de 1.100 Km desde los 20°30' hasta los 29°45'S (Mpodozis y Ramos, 1990, Scheuber y Reutter, 1992, Brown et al., 1993).

El Sistema de Falla de Atacama, se originó durante el desarrollo del arco como un sistema de falla transcurrente sinistral ligado a subducción ("trench-linked fault system"). Este sistema de fallas acomodó un componente de cizalle producto de la subducción oblicua entre las placas Aluk (Phoenix) y Sudamericana desde el Jurásico Superior y durante el Cretácico Inferior con el desarrollo de milonitas dúctiles (zonas de cizalle), con reactivaciones frágiles posteriores durante el Cenozoico con desplazamientos normales y de transcurrentes menores documentados (Naranjo et al., 1984; Hervé, 1987; Scheuber y Andriessen, 1990; Scheuber y Reutter, 1992; Armijo y Thiele, 1990; Brown et al., 1993; Reijs y McClay, 1998). Durante el Cretácico Inferior a lo largo de la Cordillera de la Costa de Antofagasta está documentada la exhumación de milonitas al sur de Antofagasta (Scheuber y Andriessen, 1990) y al mismo tiempo subsidencia en la

cuenca de “pull-apart” de El Way (Maksaev, 1990), lo que indica que se produjeron simultáneamente zonas de transtensión y transpresión a lo largo de esta estructura regional durante el Cretácico Inferior, lo que es típico en sistemas de fallas transcurrentes (Ej. Cembrano et al., 1997).

También se ha postulado una zona de falla que limitaría por el oriente, la Cordillera de la Costa del Norte de Chile. Esta zona de falla denominada “Central Valley Shear Zone” (Randall et al., 1996) la que habría sido una falla transcurrente sinistral maestra y explicaría la rotación en el sentido horario de bloques de la Cordillera de la Costa determinado por análisis de paleomagnetismo. La rotación de los bloques corticales en la Cordillera de la Costa del Norte de Chile no es explicable solo por la existencia de la zona de Falla de Atacama, puesto que se han medido rotaciones en el sentido horario de 25° que sugieren una tectónica de fallas en dominó. Si bien la ubicación de la hipotética falla o zona de falla corresponde al límite occidental de la Depresión Intermedia, por tanto cubierta por depósitos aluviales, su posición corresponde al límite occidental de la cuenca de tras-arco del Jurásico y Cretácico en el norte de Chile, la cual de todas maneras debe haber correspondido a un sistema de fallas extensionales, las que pueden haberse reactivado como de cizalle durante el Cretácico (Fig. 3).



**Figura 3:** Franja mostrando la Zona de Fallas Atacama y el sistema de fallas tipo duplex, zona de falla de del Valle Central, modificado de Camus (2003) y de Randall et al., (1996).

## II.2 CONTEXTO METALOGÉNICO

Los Andes chilenos esencialmente es una subprovincia metalogénica cuprífera, tal como lo definió Ericksen (1976).

Los trabajos comparativos de zonas de subducción de Uyeda y Nishiwaki (1980) y Uyeda (1987) mostraron que existen dos tipos extremos de zonas de subducción en las cuales existe marcada diferencia en las condiciones de esfuerzo dominantes y en su metalogénesis. La denominada subducción tipo Mariana (por el arco de las Marianas en el Pacífico occidental) donde existen condiciones no compresivas, alto ángulo de subducción y desarrollo de una cuenca marginal de tras-arco y en contraposición la subducción de tipo Chileno, compresiva, con erosión por subducción, desarrollo de una faja de pliegues y fallas tras-arco (Farrar et al., 1970; Zentilli, 1974; Thiele y Pincheira, 1987; Dallmeyer et al., 1996). En márgenes tipo Mariana están dadas las condiciones para la generación de depósitos exhalativos submarinos como los Kuroko de Japón, mientras que los márgenes tipo Chileno son favorables para la generación de pórfidos cupríferos. La subducción de tipo Chileno imperante en la actualidad en Los Andes Centrales es una situación que se mantiene desde el Cretácico Superior, mientras que durante el Jurásico y Cretácico Inferior habría imperado un sistema de subducción más afín con la subducción tipo Mariana (Davidson, 1987; Boric et al., 1990).

A pesar que la mineralización cuprífera ocurre en las rocas ígneas asociadas al arco magmático del Jurásico a Cretácico Inferior, los pórfidos cupríferos son raros; solo Andacollo mejor reconocido y algunos prospectos subeconómicos como la Zona de Alteración de Domeyko - Dos Amigos motivo de estudio en este trabajo, existen. En contraste, los pórfidos cupríferos son los depósitos económicamente más importantes asociados a las rocas ígneas de los arcos magmáticos más jóvenes en el norte de Chile (Fig. 5).

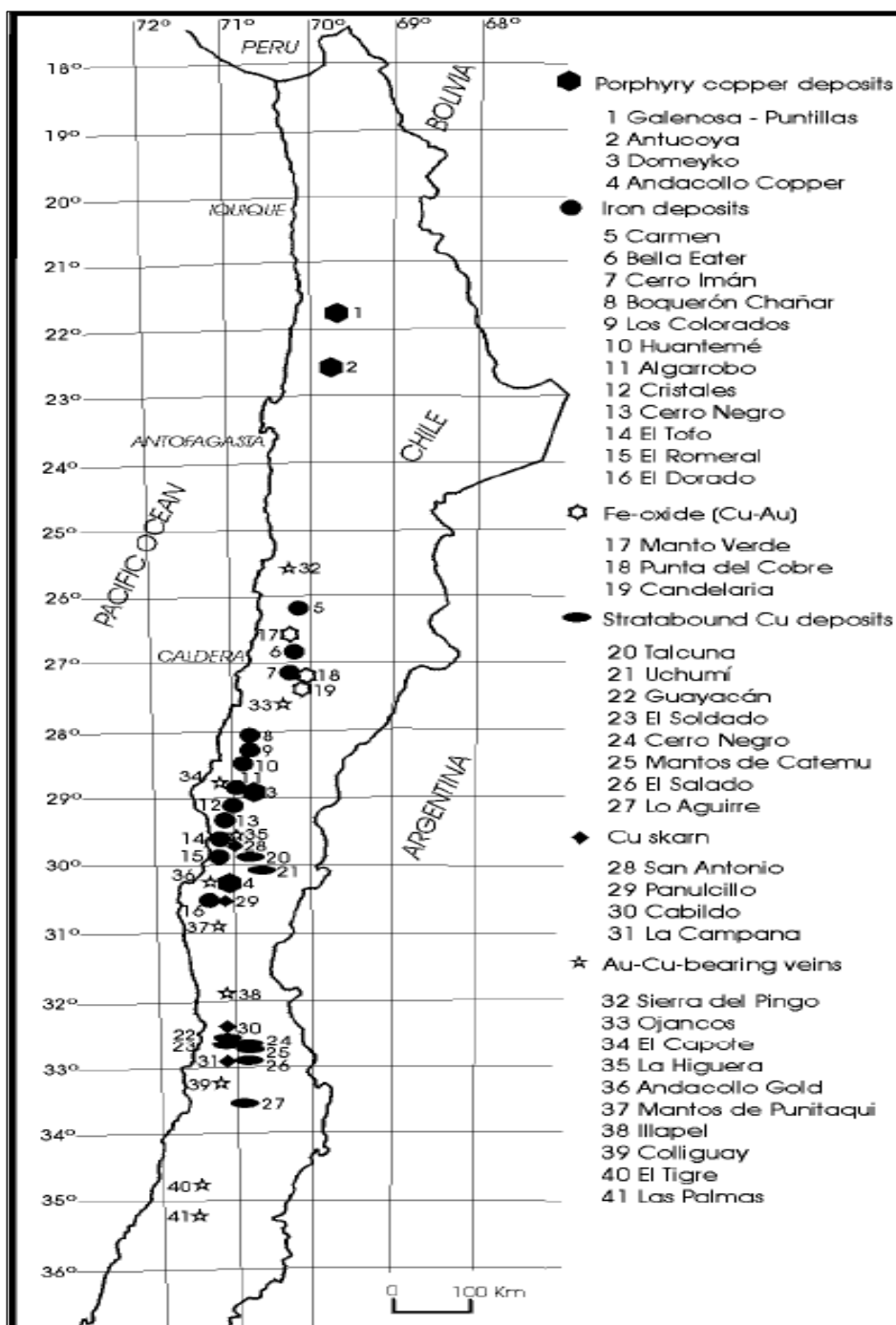
Existe un variado conjunto de tipos de depósitos metalíferos asociados a rocas del Cretácico Inferior a lo largo de la Cordillera de la Costa del norte de Chile (Fig. 4). Estos incluyen algunos pórfidos cupríferos, la mayoría de los cuales son subeconómicos a excepción de Andacollo que es el único que está en explotación (Reyes, 1991; Oyarzún

et al., 1996). Este pórfido de Cu-Au, contiene mayor ley de oro (0.23 g/t Au) de los pórfidos de Cu-Mo en explotación en Chile y hacia el oeste del pórfido existe mineralización de oro en vetas y en cuerpos estratoligados (Reyes, 1991). La Zona de alteración de Domeyko-Dos Amigos actualmente esta en explotación y se postula que de acuerdo a su posición espacial en esta franja forma parte del conjunto de depósitos metalíferos de esta edad.

Entre los 26° a 31°S, existen muchos yacimientos de Fe (magnetita – apatito) hospedados en rocas volcánicas del Cretácico Inferior en sectores aledaños a intrusivos dioríticos a granodioríticos del Aptiano-Albiano. Estos depósitos ferríferos están dentro del dominio del segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama. Ej. Cerro Imán (Vivallo et al., 1994), Cerro Negro (Vivallo et al., 1993), Bandurrias, Boquerón Chañar, Algarrobo (Montecinos, 1983), El Tofo, Romeral (Bookstrom, 1977). Existen indicios menores de mineralización de cobre y de oro ligados al mismo contexto, particularmente en la periferia de los cuerpos ferríferos o en la zona de la Falla de Atacama. En la misma zona donde se presentan los yacimientos de Fe-apatito (Véliz, 1994; Vivallo et al., 1994) existen también yacimientos de óxido de Fe (Cu-Au) como Candelaria y Manto Verde (Vila et al., 1996) y otros del distrito Punta del Cobre (Marschik y Fonboté, 1996). A lo largo de la Cordillera de la Costa existe también un gran número de vetas auríferas mesotermales las que se emplazan ya sea en cuerpos intrusivos Cretácicos o en rocas estratificadas en la periferia de las intrusiones (Fig. 4). La ocurrencia de los pórfidos cupríferos en Chile, se distribuyen en cinco fajas o franjas metalogénicas (Fig. 5), principalmente entre los 18 a 34°S y que en edad se extienden desde el Cretácico Inferior hasta el Plioceno. Estas franjas Metalogénicas son: (1) Faja Cretácica, (2) Faja Paleoceno-Eoceno Inferior, (3) Eoceno Superior-Oligoceno, (4) Oligoceno Superior-Mioceno Medio y (5) Mioceno Superior-Plioceno (Camus, F., 2003).

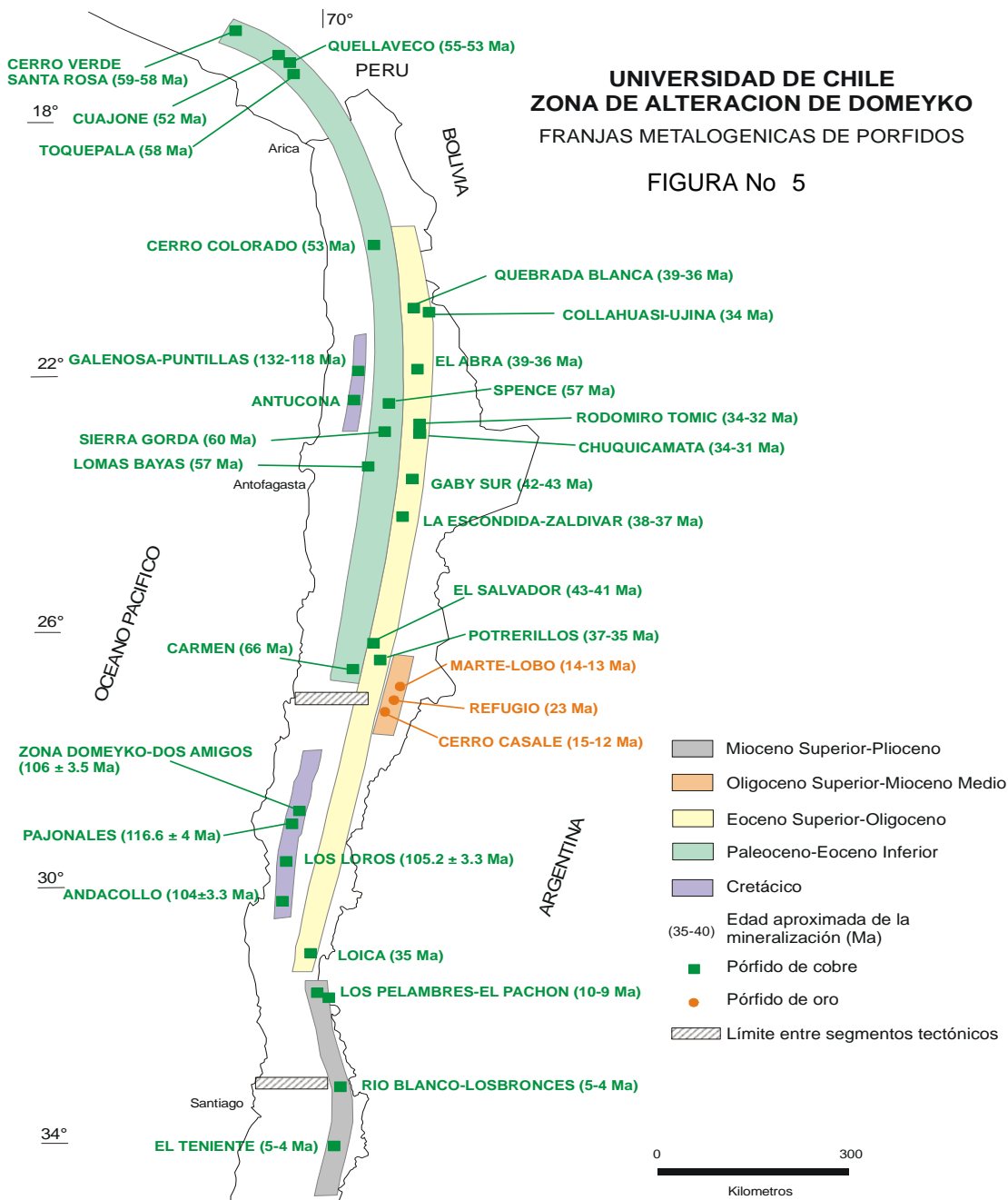
La mineralización del tipo pórfido de cobre de edad Cretácica esta reconocida en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa (Fig. 5). Esta franja se extiende por 1.500 km y en ella se han descubierto, hasta la fecha, un total de diez prospectos de tipo pórfido de cobre (Fig. 5). De acuerdo con su distribución geográfica, conforman tres grupos ubicados, el primero en el norte del país (Antucoya-Buey Muerto y Galenosa-Puntillas)

el segundo, en Chile Central (Andacollo, Domeyko, Pajonales y Los Loros) y el tercero en el sur (San José, Polcura y Galletué), (Camus, F., 2003).



**Figura 4.** Franja Metalogénica del Cretácico Inferior. De Maksaev y Zentilli 2002.





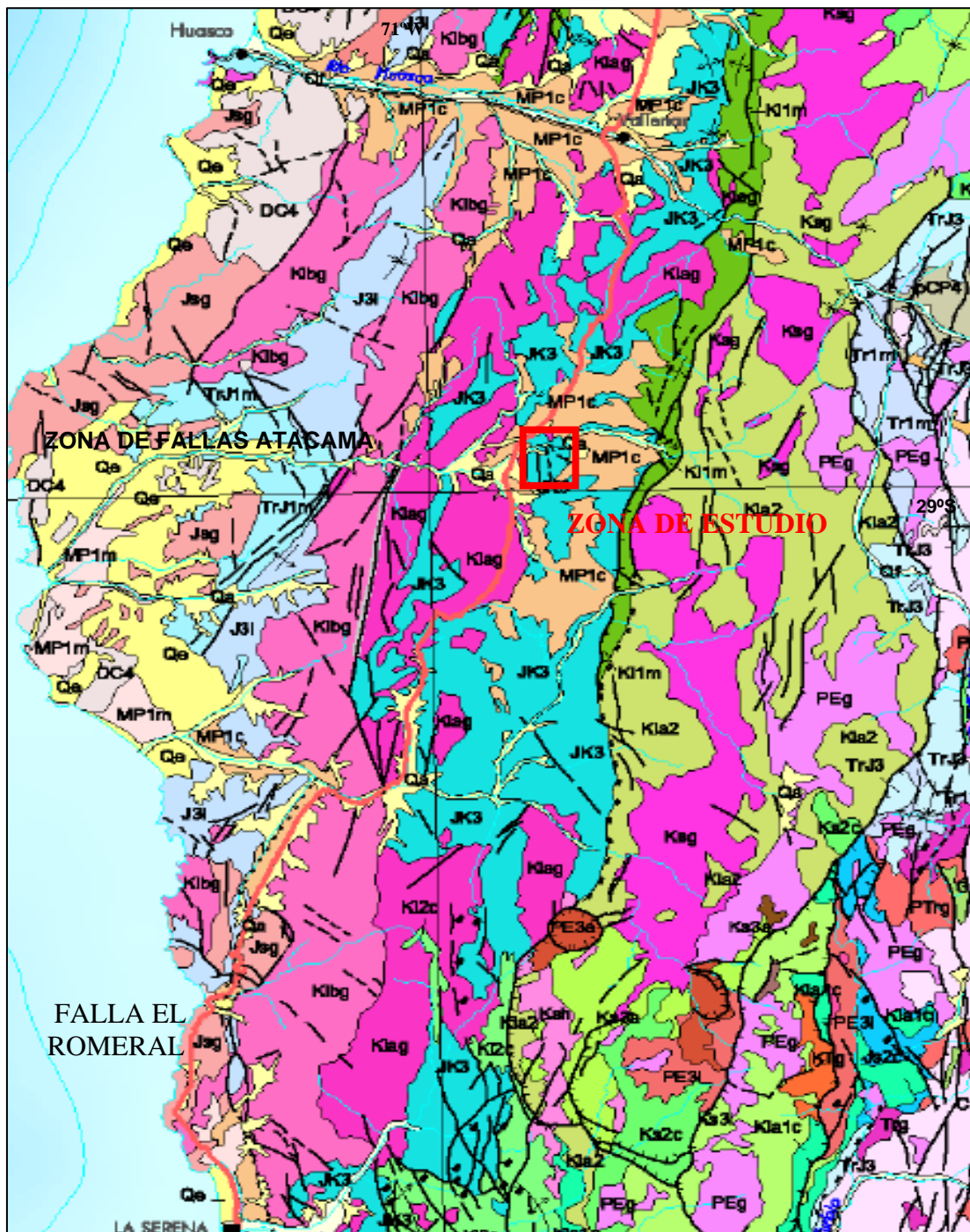
**Figura 5:** Plano que muestra la ubicación de franjas metalogénicas de sistemas porfídicos de cobre y oro en Chile y en el sur del Perú e indica los principales yacimientos y prospectos presentes en cada franja (Fuentes de edades radiométricas; Ambrus, 1977, 1979; Alpers y Brimhall, 1988; Baker, 1977; Clark et al., 1990, 1998; Cornejo et al., 1997; Cuadra et al., 1997; Gustafson y Hunt, 1975 Gustafson et al., 2001; Kurtz et al., 1997; Le Bel, 1985; Llaumet et al., 1975; Maksaev Y Zentilli, 1988, Maksaev et al., 1994; Marsh et al., 1997; Munizaga et al., 1985; Ojeda, 1990; Perelló et al. 1996, Sillitoe, 1973a; Zentilli et al., 1994A; Zweng y Clark, 1995).

### II.3 GEOLOGÍA REGIONAL

La geología regional del área comprendida entre las ciudades el Vallenar y La Serena al norte y sur, respectivamente, se caracteriza por la presencia de franjas de afloramientos elongados de dirección aproximada NNE-SSW conformadas por rocas de edad Paleozoico al reciente (Fig. 6).

En la zona de estudio, en el borde oriental del batolito de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Mercado, 1978) que intruye el basamento del Paleozoico Superior, se desarrollaron en el mesozoico cuencas de tras-arco que acompañaron la subducción durante este período y dentro de las cuales se acumularon miles de metros de lavas andesítico-basálticas en respuesta al volcanismo registrado durante el Cretácico Inferior, asociados con sedimentos marinos y continentales que incluyen a la formación Bandurrias (Seegerstron 1960), el Grupo Chañarcillo (Seegerstron, 1968) y la Formación Cerrillos (Seegerstron y Parker 1959). Dicha secuencia constituye la “Cuenca Marginal Abortada en Chile Central”, esta limitada por 28°-33° Lat. S (Aberg et al., 1984; Mpodozis y Ramos, 1990), cubierta discordantemente por lavas e ignimbritas asociadas a intrusivos y calderas del Paleoceno-Eoceno (Sillitoe et al, 1968; Rivera y Mpodozis.1991).

Al sur de la zona de estudio (Fig. 6), en las inmediaciones de la ciudad La Serena, se desarrolló en el Jurásico un arco magmático con facies intrusivas (monzodioritas, dioritas de piroxenos) y extrusivas (Complejo Volcánico Agua Salada (Emparan y Pineda, 2000); hacia el este en el tras-arco se desarrolló una plataforma sedimentaria (Plataforma Aconcagua; Mpodozis y Ramos, 1989). En el Cretácico temprano por adelgazamiento y estiramiento de la corteza continental, se desarrolló lo que se ha interpretado como “cuenca marginal abortada” (Aberg et al., 1984); ésta se caracterizó por la erupción de andesitas-basálticas, basaltos y andesitas (Formación Arqueros), pero sin llegar a formar corteza oceánica. En el Hauteriviano se reactivó o intensificó el proceso de estiramiento o extensión de la corteza continental, desarrollándose un sistema de fallas de relevo en la “cuenca marginal”, que provocó un intenso proceso de erosión, sedimentación y posterior volcanismo al Norte de la serena (Formación Quebrada Marquesa).



**Figura 6.** Plano Geológico Regional Esc: 1: 1 000.000. Publicación SERNAGEOMIN-2002.

## LEYENDA

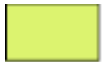
### ROCAS SEDIMENTARIAS



Qa: Depósitos aluviales subordinados coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos.



MP1C: Mioceno: Gravas de Atacama



KIa2: Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas Formación Cerrillos.



KI1m: Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, areniscas Grupo Chañarillo (Cretácico Inferior (Neocomiano)).



JK3: Jurásico Superior-Cretácico Inferior, Secuencias volcánicas con intercalaciones clásticas continentales y marinas. Formación Arqueros, Formación Quebrada Marquesa y Grupo Bandurrias.



J3I: Jurásico, secuencias volcánicas continentales y marinas: Complejo Subvolcánico Agua Salada.



TrJ1m: Triásico-Jurásico Inferior, Secuencias sedimentarias marinas litorales y transicionales: Formación Canto del Agua.

### INTRUSIVOS



Ksg: Cretácico Superior (90-65 Ma) Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos.



Kiag: Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma) Dioritas y monzonitas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos.



Kibg: Cretácico Inferior Bajo (114-124Ma). Monzodioritas y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas.



Jsg: Jurásico Medio-Superior (180-142Ma). Monzodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda.

### II.3.1 Rocas Estratificadas

Un conjunto de rocas, predominantemente volcánicas, con intercalaciones sedimentarias, clásticas y calcáreas marinas que afloran entre los 28° y 30° Lat. S, ha sido definido como Formación Bandurrias (JK3, Fig. 6) por Segerstrom (1960). Está constituida por lavas andesíticas, andesitas porfíricas y brechosas con intercalaciones de estratos lenticulares de areniscas, fangolitas rojizas, conglomerados rojizos, calizas lenticulares de aspecto macizo y lentes de arenisca con estratificación cruzada. La litología consiste, fundamentalmente, en andesitas porfíricas con grandes fenocristales de plagioclasa, en una masa fundamental afanítica. Las rocas volcánicas presentan en algunos casos, formas almohadillas (Jurgan, 1977b; Moscoso, 1979a). Moscoso (1982) elevó la Formación Bandurrias (Neocomiano), a la categoría de Grupo y consideró a las formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa como unidades con continuidad areal hacia el sur (área La Serena, Emparán y Pineda, 2000). La Formación Arqueros (Aguirre y Egert, 1962; modificada por Emparán y Pineda, 1999) consiste en una secuencia volcánica de color gris oscuro, con intercalaciones sedimentarias marinas, de 260 hasta 600 m de espesor, se reconocen facies de andesitas, andesitas basálticas y basaltos, en parte amigdaloidales. Incluye andesitas basálticas de clinopiroxeno y anfíbola porfíricas, con 35 a 40% de fenocristales de plagioclasas, de 3 a 4 mm, e intercalaciones de brechas líticas andesíticas, filones manto de pórfidos andesíticos, areniscas calcáreas fosilíferas, calizas bioclásticas blancas y rojas. Por el contenido faunístico tipo *trigonias* de la asociación de facies, Emparán y Pineda (1999) le señalan una edad Neocomiana. La Formación Quebrada Marquesa (Aguirre y Egert, 1965; modificada por Emparán y Pineda, 1999). Es una secuencia sedimentaria y volcánica, principalmente continental de 1.000 m de espesor, de color pardo rojizo. Cubre en aparente concordancia a la Formación Arqueros, aunque en general el contacto es por falla (Emparán y Pineda, 2000); consiste en brechas epiclásticas pardo rojizas, matriz soportadas, con fragmentos angulosos (1 cm a 1,2cm) de andesita y, en menor proporción granitoides, presentan intercalaciones de areniscas, tobas y andesitas, areniscas calcáreas lacustres laminadas, de color amarillo verdoso. La edad de esta Formación está indicada por la fauna fósil marina, neocomiana identificada en sus niveles basales y por la relación de intrusión con el plutón datado en ca. 111 Ma en el

área La Serena-La Higuera. Emparán y Pineda (2000) la ubican en el rango Neocomiano-Aptiano?

En la parte centro oriental de la Fig. 6 y a unos 10 km al este de la zona de estudio, aflora una secuencia de rocas sedimentarias marinas, constituidas principalmente por calizas fosilíferas, calcarenitas y niveles margosos, portadora de fauna Neocomiana que por sus características litológicas, contenido faunístico y continuidad areal, fue asignada al Grupo Chañarcillo (MP1C) (Abad, 1976a, 1977, 1980; Gajardo, 1976, 1978; Moscoso, 1977, 1979a). Estas rocas calcáreas del afloran en una franja continua de dirección norte sur, que atraviesa el área desde su límite sur 29°10 hasta 28° latitud sur (Fig. 6), engranan al oeste con la Formación Bandurrias (Segerstrom, 1960a y b, 1963; Abad 1976a, 1977, 1980; Moscoso, 1976, 1977, 1979a). Jurgan (1977a y b) determinaron un espesor que varía de 1650 m a 600. La numerosa fauna fósil encontrada en los diferentes niveles la establecen en el lapso Hauteriviano-Barremiano y probablemente Aptiano (Segerstrom y Parker, 1959; Corvalán, 1974). En la zona más oriental de la zona de estudio (Kia2, Fig. 6), aflora un conjunto de rocas predominantemente epiclásticas (conglomerados, brechas y areniscas con algunos lentes de lutitas y calizas), en su sección inferior y volcánico-epi-piroclásticas (andesitas, brechas, conglomerados con intercalaciones finas) en su sección superior que, por sus características litoestratigráficas, ha sido reconocido como la Formación Cerrillos (Reutter, 1974; Abad, 1976a y b, 1977; Gajardo 1978; Moscoso, 1977, 1979a). La Formación Cerrillos aflora en una franja casi continua, entre los 28 y 30° latitud sur (Fig. 6). El espesor de la secuencia es difícil de determinar debido a fallas, pliegues y a los numerosos stocks que la intruyen. Al Sur del río Huasco, la potencia aumenta considerablemente. Al este de Domeyko (zona de estudio) la secuencia alcanza un espesor de 3.000 a 4.000 m (Moscoso, 1979a). La Formación Cerrillos, tiene una edad máxima post-aptiana, pues sobreyace, discordantemente, a los Grupos Chañarcillo y Bandurrias, de edad mínima Aptiana. Por otra parte, Casamiquela et al. (1969), basado en el hallazgo de restos de dinosaurios, en rocas de la parte superior de la Formación Viñita (equivalente a Cerrillos) determinó una edad mínima maestrichtiana. Las características litológicas de la Formación Cerrillos sugieren un ambiente de depositación subárea (presencia de restos saurios) con volcanismo asociado, en el cual, localmente, se habrían desarrollado episodios de condiciones subacuáticas,

posiblemente de tipo lacustre, en la que se depositaron los sedimentos finos (lutitas o calizas). La Formación Cerrillos marcaría el inicio de un ciclo de depositación continental con volcanismo asociado, que post-data la depositación marina del Cretácico Inferior (Moscoso, 1982).

Un conjunto de sedimentos que aflora rodeando la zona de estudio (Fig. 6), poco o medianamente consolidados, que incluyen gravas de bolones, gravas, arenas y ripios, con intercalaciones de ignimbritas constituyen las denominadas Gravas Atacama que cubren las rocas preexistentes. Estas serían de edad Mioceno Medio a Superior y forman parte del denominado Pediplano de Atacama (Mortimer, 1973; Mercado, 1978a, b y c; Naranjo, 1978)

### **II.3.2 Rocas Intrusivas**

Entre los 28° y 30° latitud sur, específicamente entre las ciudades Vallenar y la Serena al norte y sur respectivamente (Fig. 6). Las rocas intrusivas de oeste a este se distribuyen en cuatro franjas de dirección norte-sur a nor-noreste, definidas por su posición geográfica y temporal, constituidas por extensos plutones, cuyas edades varían desde el Jurásico al Terciario (SERNAGEOMIN, 2003). Franja Jurásico Medio-Superior (Fig. 6; nomenclatura (Jsg), 180-142 Ma), Franja Cretácico Inferior Bajo (Fig. 6; nomenclatura (Kibg), 144-124 Ma), Franja Cretácico Inferior Alto-Cretácico Superior Bajo (Fig. 6; nomenclatura (Kiang), 123-85 Ma) y la Franja Cretácico Superior (Fig. 6; nomenclatura (Ksg), 90-65 Ma).

La Franja Jurásico Medio-Superior (nomenclatura Jsg, 180-142 Ma), está constituida por monzodioritas cuarcíferas, monzodioritas, dioritas y gabros de biotita, anfíbola y piroxeno de grano medio, en parte, con tendencia porfírica. Estas rocas intruyen al complejo subvolcánico Agua Salada. Emparán y Pineda (2000) en el área La Serena (al sur de la zona de estudio). En este grupo de intrusivos obtuvieron una edad K-Ar en roca total  $143 \pm 6$  Ma y una edad U-Pb de  $145 \pm 4$  Ma. La Franja Cretácico Inferior bajo (nomenclatura (Kibg), 144-124 Ma), está constituido por monzodioritas, y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas, afloran al este de la Franja Cretácico Inferior bajo e intruyen al Complejo Subvolcánico Agua Salada y a dioritas del Jurásico-Cretácico. En las cercanías a La Serena, Emparán y Pineda (2000) en

granodioritas de biotita-piroxeno y de anfíbola de grano medio obtuvieron edades K-Ar en biotita de  $131 \pm 3$  Ma, una de ellas reportada por Gana (1991). También en sienogranitos de biotita obtuvieron 7 edades de K-Ar en biotita entre 120 y 130 Ma (una de ellas,  $129 \pm 3$  Ma, reportada por Gana, 1991) y una edad de U-Pb en circones de  $126,5 \pm 2$  Ma que se interpreta como de cristalización. Franja Cretácico Inferior Alto-Cretácico Superior Bajo (nomenclatura (Kig), 123-85 Ma), está constituido por intrusivos graníticos a dioríticos. Emparán y Pineda (2000) en el área La Serena (Fig. 6), separaron esta franja en dos subfranjas de intrusivos en el rango de 130-110 Ma y 100-97 Ma respectivamente. En la zona de estudio, se le denomina el Batolito del Cordón de Las Bandurrias que aflora hasta la ciudad de Vallenar (Fig. 6) está constituida por rocas intrusivas que, litológicamente, incluyen dioritas, granodioritas y tonalitas. La edad de las rocas de esta franja, de acuerdo con sus relaciones estratigráficas, es principalmente post-neocomiana, por intruir a rocas del Grupo Bandurrias (Neocomiano) y más al sur (La Serena) a las Formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa. Dataciones radiométricas de Emparán y Pineda (2000) en dioritas de piroxeno y anfíbola (Valle del Elqui, área de La Serena; Fig. 2) de color gris medio a claro y de grano grueso a medio han entregado una edad de K-Ar de  $111 \pm 3$  Ma. Dos muestras tomadas para datación en granodiorita de biotita que aflora en el borde oeste de la zona de estudio, específicamente en el Batolito del Cordón De las Bandurrias, entregan una edad de  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  en biotita de  $94,5 \pm 0,8$  Ma y otra edad de U-Pb en circones de  $99,6 \pm 1,8$  Ma, que se interpreta como cercana al enfriamiento del batolito, (esta interpretación se discute con detalle en el Capítulo de Geocronología). Zentilli, (1974) en 1 muestra de granodiorita ubicada a 90 km al norte de la zona de estudio (Sierra del Nicho) entregó una edad de K-Ar en biotita de  $120 \pm 3,8$  Ma. La Franja Cretácico Superior (nomenclatura (Ksg), 90-65 Ma), aflora al oeste de la zona de estudio (Fig. 6), está constituida por numerosos plutones graníticos, granodioríticos, monzoníticos a dioríticos. Intruyen a las formaciones Cerrillos (Cretácico Superior) y Los Elquinos (Terciario Inferior), en las cuales han provocado aureolas de metamorfismo de contacto. Emparán y Pineda (2000) en el área de La Serena en una monzodiorita de anfíbola y de biotita, de grano medio a grueso y de color rosado, obtuvieron una edad de K-Ar en biotita de  $93 \pm 2$  Ma. Por otra parte, dataciones radiométricas (K-Ar), en rocas del plutón Merceditas, cercanas al área de estudio, arrojaron valores de  $59,8 \pm 0,9$  Ma y  $66,6 \pm 1,2$  Ma (Farrar et al., 1970; Conn, 1974; Abad, 1976a).



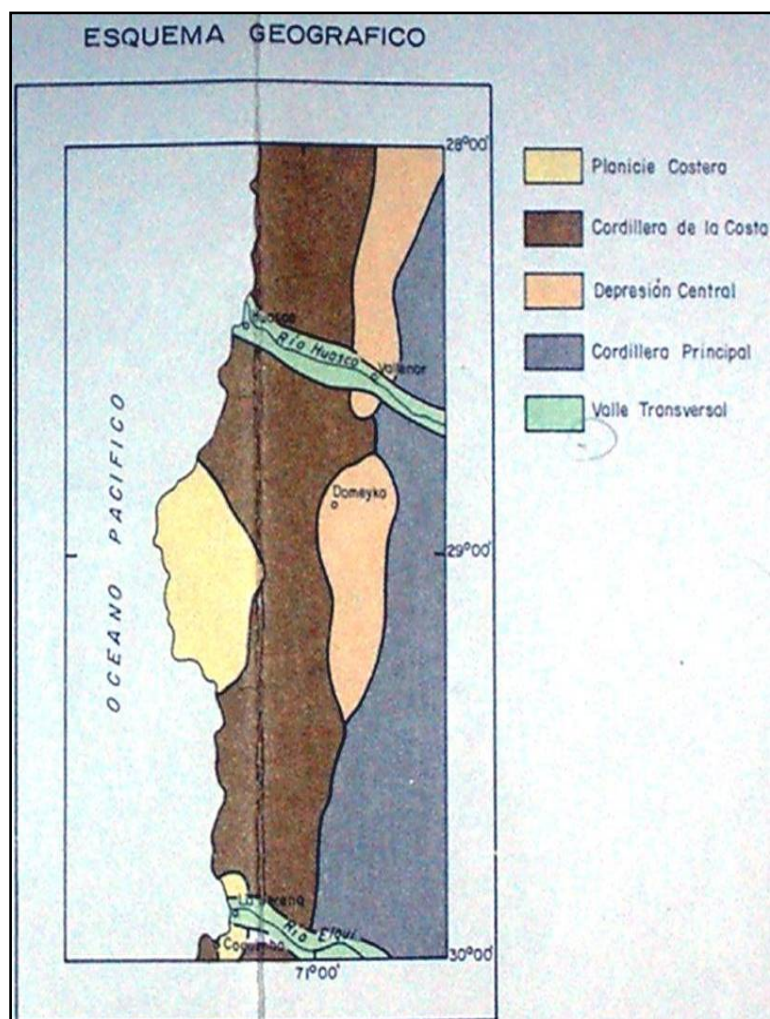
## II.4 ESTRUCTURA REGIONAL

La zona de Vallenar y parte norte de la Serena, entre los 28° y 30° Lat,S, presenta características que permiten distinguir tres dominios estructurales distintos, que corresponden a las tres divisiones morfogeológicas clásicas: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal (Moscoso,1982, Fig. 7). En la Cordillera de la Costa, las unidades litológicas muestran variados elementos estructurales, como pliegues, fallas y discordancias.

Las rocas del Complejo Subvolcánico Agua Salada (interpretada como Grupo Bandurrias por Moscoso, (1982) y enmendada por Emparán y Pineda (2000)) y areniscas de la Formación Canto del Agua (Fig. 6, nomenclatura Tr-J1M) en el C° Samatina (15 km al oeste de la zona de estudio) presentan pliegues isoclinales, cuyos ejes tienen marcada orientación noroeste-sureste, y los planos axiales mantean hacia el NNE.

Uno de los rasgos más definidos e importantes en la Cordillera de la Costa es el sistema de falla que conforma la Zona de Falla de Atacama (Arabasz, 1971), reconocida desde el sur de Iquique hasta el Romeral, al norte de La Serena (Fig. 3) El presente estudio solo cubre la zona en su tramo, norte de La Serena y la ciudad de Vallenar (Arabasz, 1971; Mercado, 1977, 1978a, b y c; Moscoso, 1977, 1979a, Fig. 6). Esta megafalla se ubica a lo largo de la Cordillera de la Costa, controla la distribución de los principales yacimientos de hierro Cretácicos (Fig. 3) (Vivallo et al., 1993, 1994; Montecinos, 1983; Bookstrom; 1977; Vila et al., 1996; Marschik y Fonboté, 1996). Al norte de La Serena Emparán y Pineda (2000) definieron la Zona de Falla Romeral como una estructura regional de dirección general norte-sur, que se ubica cerca a la línea de la costa y que marca, un cambio notable en la edad y características litológicas de la unidades aflorantes hacia ambos lados de ella. La Zona de Falla Romeral tiene continuidad geográfica hacia el norte con la Zona de Falla de Atacama (Taylor et al., 1998; Scheuber y Andriessen, 1990). Según Emparán y Pineda (2000), esta falla en su trazado presenta segmentos con rocas foliadas, como ocurre en la zona cercana a la mina Romeral, donde la milonitas han entregado dos edades K-Ar en roca total de  $115 \pm 4$  y  $108 \pm 4$  Ma y una edad en biotita de  $113 \pm 3$  Ma. Estas edades según estos autores son indicativas, de una fase de deformación dúctil en la Zona de Falla Romeral, durante el Cretácico Inferior. En la Fig. 6 La Zona de Falla el Romeral, separa dos dominios estructurales: 1)

El Dominio Costero situado al oeste de la Zona de Falla de Atacama en la zona de estudio y oeste de la Zona de Falla Romeral (norte de la Serena), esta constituida exclusivamente, por rocas intrusivas de edad Jurásica-Cretácica Inferior y afloramientos del Complejo Subvolcánico Agua Salada (Jurásico) y la Formación Canto del Agua (Triásico-Jurásico) y 2) El Dominio Occidental (Emparán y Pineda, 1999), al este de la Zona de Falla Romeral (norte de La Serena) y Este de la Zona de Fallas de Atacama, se caracteriza por afloramientos de granitoides cretácicos, con edades decrecientes hacia el este (130-93 Ma) que intruyen a las Formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa (al norte de la Serena), a los Grupos Bandurrias y Chañarcillo en la zona de trabajo.



**Figura 7:** Esquema morfoestructural de la zona de estudio.

La Depresión Central (Fig. 7) corresponde a varias depresiones tectónicas, alineadas, que forman un esbozo de valle central de las cuales sólo se ha tipificado la del sector de Domeyko (Moscoso, 1979a). Es una depresión tectónica entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Principal (Fig. 7). Su ancho máximo alcanza alrededor de 25 Km (entre las quebradas Pastos Largos y Sierra Agua de los Burros) y esta limitada, al oriente, por una falla inversa de proyecciones regionales y, al poniente por una falla (¿normal?) del sistema de Zona de Falla de Atacama (Moscoso 1982). Las rocas del Grupo Bandurrias principalmente, han sido afectadas por pliegues y pequeñas fallas. Las rocas del Grupo Bandurrias se presentan en general, manteniendo suavemente hacia el este (15-25°) con ondulaciones amplias, que se hacen más apretadas a medida que se acercan a las fallas inversas hacia el oriente.

La discordancia entre las gravas y conglomerados miocenos (Gravas de Atacama) y las rocas de los Grupos Bandurrias y Chañarcillo es la más notable en el área de estudio, ya que las gravas conforman estructuras horizontales que sellan las estructuras anteriores (Moscoso, 1982).

## **II.5 GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ALTERACION DE DOMEYKO.**

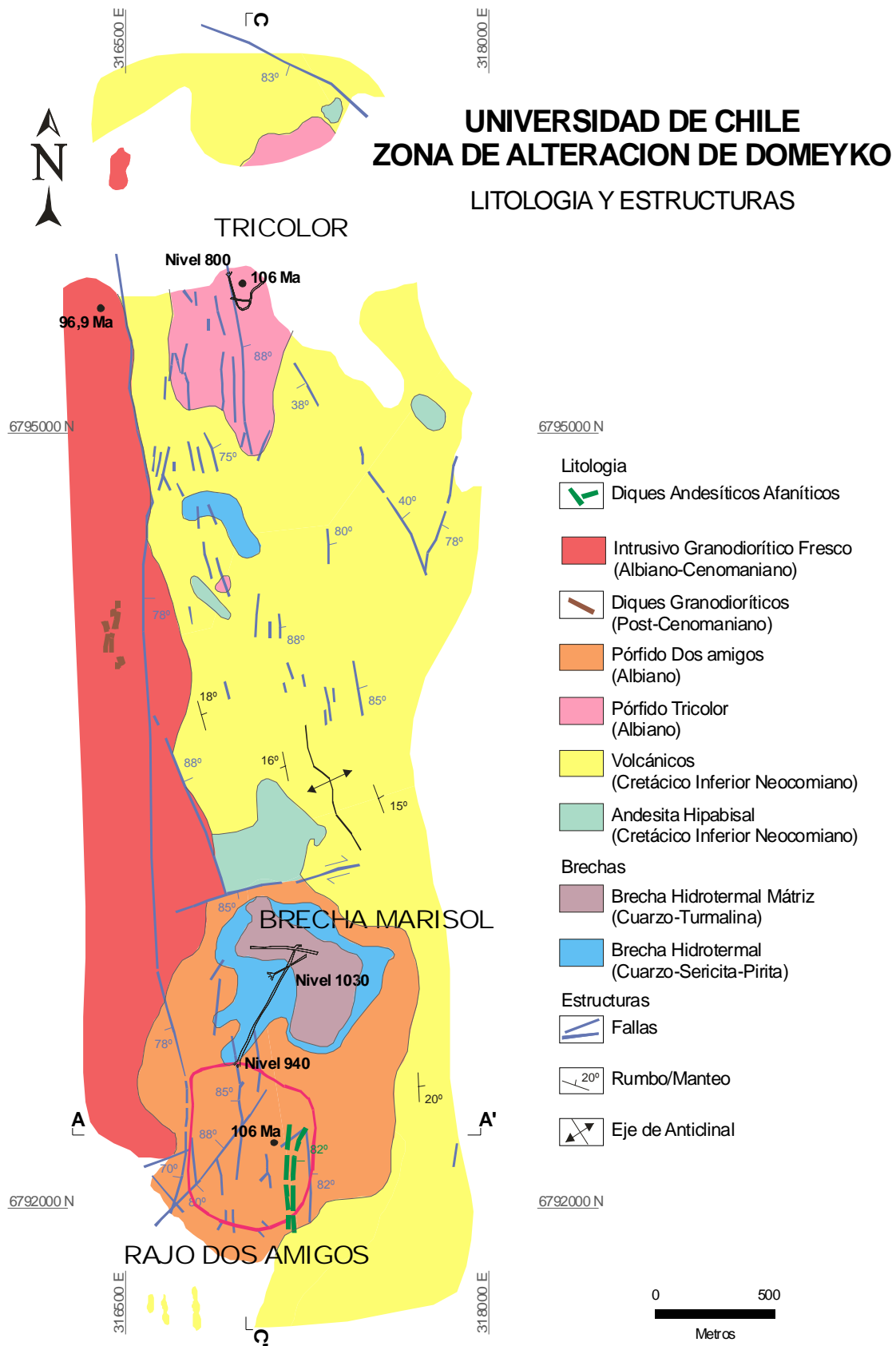
### **II.5.1 Litología**

En la Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko, afloran rocas intrusivas, volcánicas con ocurrencias menores de rocas sedimentarias (Fig. 8). Las rocas intrusivas que afloran en la zona de estudio, corresponden a un 30% del total de rocas aflorantes, regionalmente forman parte del denominado Batolito del Cordón Las Bandurrias (conjunto de rocas intrusivas de diferente composición que aflora al oeste de la zona de estudio y cubre un área NS de unos 500 km<sup>2</sup>). Las rocas volcánicas ocupan el 50% del área de estudio y afloran al oeste, en contacto irregular con las rocas intrusivas del batolito. Moscoso et al. (1982) las asignó al Grupo Bandurrias (Fig. 6). Pórfidos intrusivos cubren el 20% del área de estudio, tiene formas semicirculares en planta y afloran en la Zona Tricolor y el Rajo Dos Amigos (Fig. 2, Fig. 9). El pórfido Tricolor aflora al norte de la zona de estudio e intruye rocas volcánicas principalmente. El pórfido Dos Amigos aflora al sur de la zona de estudio y se emplaza en el contacto de rocas intrusivas del batolito con rocas volcánicas neocomianas (Fig. 8).

### **II.5.1.1 Rocas Estratificadas**

En la zona de alteración hidrotermal de Domeyko, afloran principalmente rocas volcánicas con algunas intercalaciones delgadas de hasta 1 m de potencia de rocas carbonatadas (calizas y lutitas). El rumbo de capas es N10°-30°W promedio con manteo de 10-25° al SE. Las observaciones de campo permiten definir: aglomerados volcánicos pobremente estratificados, en la cual las rocas que la componen están constituidas por fragmentos andesíticos subredondeados a subangulosos en el orden de milímetros hasta más de 5 cm., incluidos en una matriz fina de composición andesítica. El conjunto de lavas y brechas volcánicas, comprende una alternancia de brechas y flujos de lava de composición andesítica. Las brechas presentan fragmentos angulosos a subredondeados de hasta 20 cm en una matriz de andesita porfírica. Las andesitas son de color gris oscuro y cuando están alteradas presentan coloración blanca a gris clara.

Al microscopio 4 secciones delgadas de rocas volcánicas (KP-12, DAS-6, TRE-05, MA-09; Anexo I, Tabla 1), permiten definir las, como rocas holocristalinas, porfíricas algunas veces con textura vesicular rellenas con cloritas. Los fenocristales de plagioclasa (cristales anhedrales y subhedrales de 0,1 a 1mm de longitud) y trazas de rutilo, están inmersos en una matriz de grano fino de microlitos de plagioclasa y cuarzo. Se las clasifica como andesitas porfíricas. Las rocas están afectadas por alteración hidrotermal y tienen la textura y mineralogía, total o parcialmente destruida, pero la alteración hidrotermal es débil en zonas distales del sistema hidrotermal.

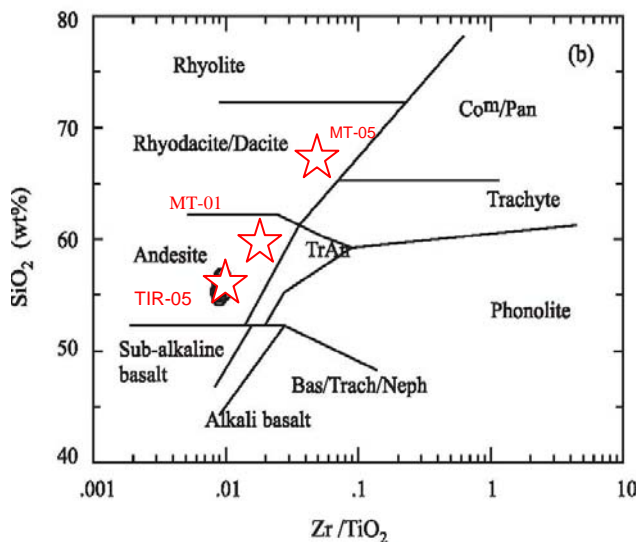


**Figura 8.** Plano Geológico de La Zona de Alteración De Domeyko.

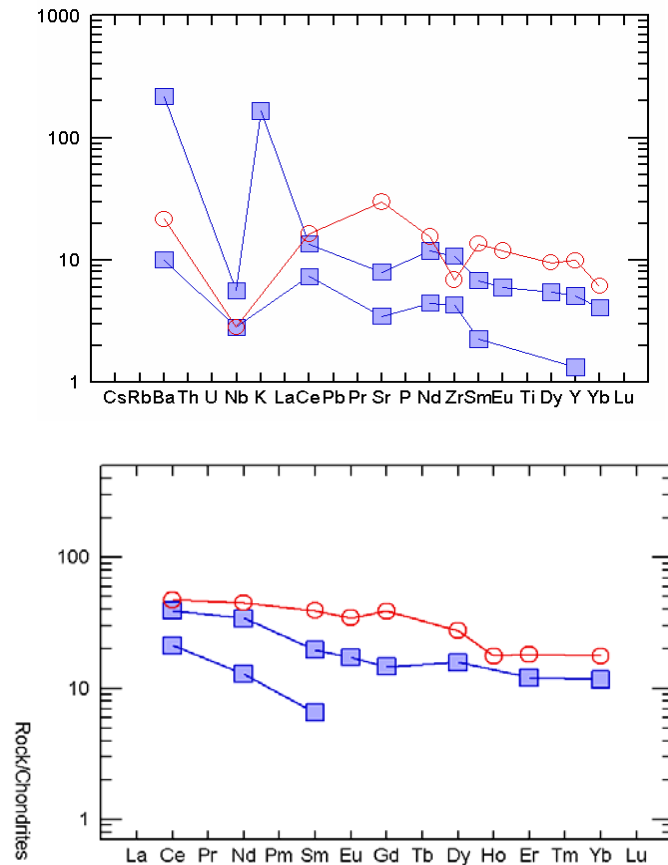
## GEOQUIMICA

Tres muestras representativas (MT-05, MT-01 y TIR-05) de las rocas volcánicas, (indicados en la Tabla 1 y 2; Anexo 1, donde también está la ubicación geográfica de las muestras en coordenadas UTM (Tabla 1) y su análisis geoquímico (Tabla 2). Para efectos de tratamiento de los datos se ha recalculado los contenidos de elementos, a una base libre de volátiles (agua, anhídrido carbónico). El mismo procedimiento se usó para las rocas intrusivas.

El ploteo de resultados de tres muestras de rocas volcánicas alteradas (Anexo I, Tabla 2) en la Figura 9, indica una afinidad litológica andesítica y dacítica. Se ha usado el diagrama de Winchester y Floyd (1977) debido a que las rocas están afectadas por alteración hidrotermal. La composición de los elementos traza de las tres muestras de rocas volcánicas son comparadas en la Figura 10. Este indica moderada a débil anomalía negativa de Nb y Ti, débil anomalía negativa en Sr. La muestra TRI-K muestra fuerte anomalía positiva de K (alterada con biotita), las tres muestras indican débiles anomalías positivas de Ba y Zr. Los patrones de elementos de tierras raras (REE), caracterizan un enriquecimiento monótono de elementos livianos. La carencia de anomalías fuertes de Nb y Ti que son característica de arcos magmáticos, sugiere un ambiente de tras-arco y pueden representar fusión de el manto a pequeña escala en proceso tectónico de tras-arco a rifting (e.g. Fitton et al.,1988; Ringwood, 1990; Righter and Carmichael, 1992). El número de muestras no es representativo estadísticamente, pero indica un acercamiento a esta hipótesis.



**Figura 9.** Se muestra diagrama de Winchester y Floyd (1977) con resultados de análisis químico de roca total (Tabla No 2) de 3 muestras tomadas en rocas volcánicas de la zona de estudio, presentan afinidad andesítica a dacítica.



**Figura 10:** Diagrama de elementos traza en la figura superior y de tierras raras en la figura inferior, para tres muestras de rocas volcánicas. Los elementos traza indican débil a moderada anomalía negativa de Nb. Las tierras raras sugieren que las andesitas se generaron en un ambiente de tras-arco (ausencia de anomalías de Eu). Valores Normalizados según Sun and McDonough (1989).

### II.5.1.2 Rocas Intrusivas

#### Pórfidos Dos Amigos y Tricolor:

Existen dos stocks de pórfidos en la zona de trabajo. En la parte norte del área de estudio se ubica el **pórfido Tricolor**, el cual tiene forma semicircular en planta con elongación mayor NNE y cubre un área de 0,3 km<sup>2</sup>. Al microscopio presenta textura porfírica con fenocristales de plagioclasa de hasta 3 mm alteradas a sericita y pocos ojos de cuarzo subhedrales con extinción ondulosa, biotita secundaria diseminada de grano fino (Foto 1). La masa fundamental es un agregado microcristalino fino de cuarzo-feldespatos. La muestra KP-09 (Tabla 1, Anexo 1) presenta foliación y recristalización milonítica de biotita (tiene coordenadas UTM 316912E, 6795450N).



**Foto 1.** Pórfido tonalítico a granodiorítico del rajo Dos Amigos. Se observa textura porfírica Fenocristales de plagioclasas y ojos de cuarzo de hasta 1mm. Las vetillas oscuras son de biotita magnetita en una masa fundamental de cuarzo-feldespatos.

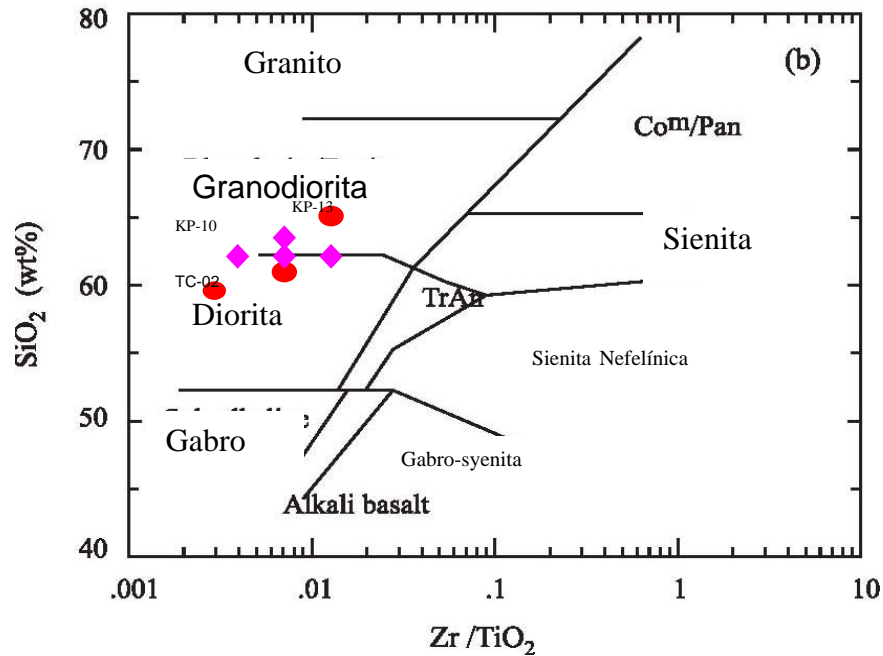
En la parte sur de la Zona de Alteración de Domeyko aflora el **pórfido Dos Amigos** en forma de elipse elongada N-S en planta y cubre un área de 1 km<sup>2</sup> aproximadamente. Al microscopio (Muestras, KP-08, KP-10-14, KP16, TRI-K2, TS-1, DAS-12, DAN-08, TRE-05 y DAE-4; en Anexo II) presenta fenocristales de plagioclasa y ojos de cuarzo de hasta 4 mm de diámetro con extinción ondulosa, cristales anhedrales de feldespato de hasta 1 mm con pátinas sucias, la biotita es de grano fino se presenta como agregados locales y diseminada en una matriz obliterada por alteración.

## **GEOQUIMICA**

7 muestras representativas de los pórfidos con fuerte alteración (KP-08, KP-10, KP-13, KP-14, TRI-K2, TRI-K3, TC-02) se analizaron por elementos mayores y traza (indicados en la Tabla 2; Anexo 1, donde también está la ubicación geográfica de las muestras en coordenadas UTM (Tabla 1) y su análisis geoquímico).

El ploteo de 7 muestras de rocas porfíricas con fuerte alteración (Anexo I, Tabla 2) en la Figura 11, indica litología afín con pórfidos tipo dioritas a granodioritas. Se muestra diagrama de Winchester & Floyd (1977) para rocas afectadas con alteración hidrotermal.

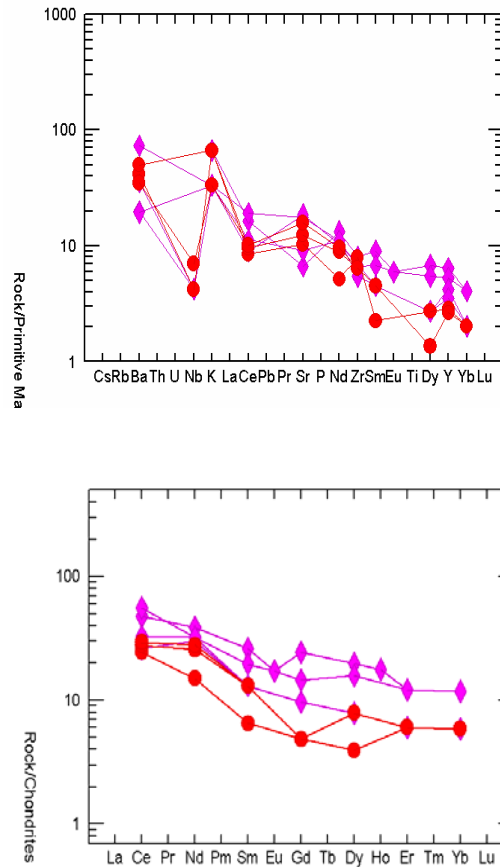




**Figura 11.** Se muestra diagrama de Winchester & Floyd (1977) con resultados de análisis químico de roca total de 7 muestras tomadas de pórfidos intrusivos; círculos rojos (Dos Amigos), rombos morados (Tricolor), presentan afinidad diorítica a granodiorítica.

La composición de los elementos traza de estas 7 muestras de rocas porfíricas son comparadas en la Figura 12 donde se observa una anomalía negativa de Nb en las muestras del pórfido Dos Amigos (Fig.12, círculos rojos); las muestras del Pórfido Tricolor no presentan anomalías de Nb y Ti (Fig. 12, rombos morados) y muestran anomalías en K (son rocas con alteración potásica).

Los patrones de elementos de tierras raras (REE) se caracterizan por un enriquecimiento monótono de tierras raras livianas. La débil y/o ausencia de anomalías fuertes de Nb y Ti, que son característica de arcos magmáticos, y el enriquecimiento relativo de tierras livianas con respecto a las pesadas, sugiere un ambiente de tras-arco y pueden representar fusión de el manto a pequeña escala en proceso tectónico de tras-arco a rifting (e.g. Fitton et al.,1988; Ringwood, 1990; Richter and Carmichael, 1992).

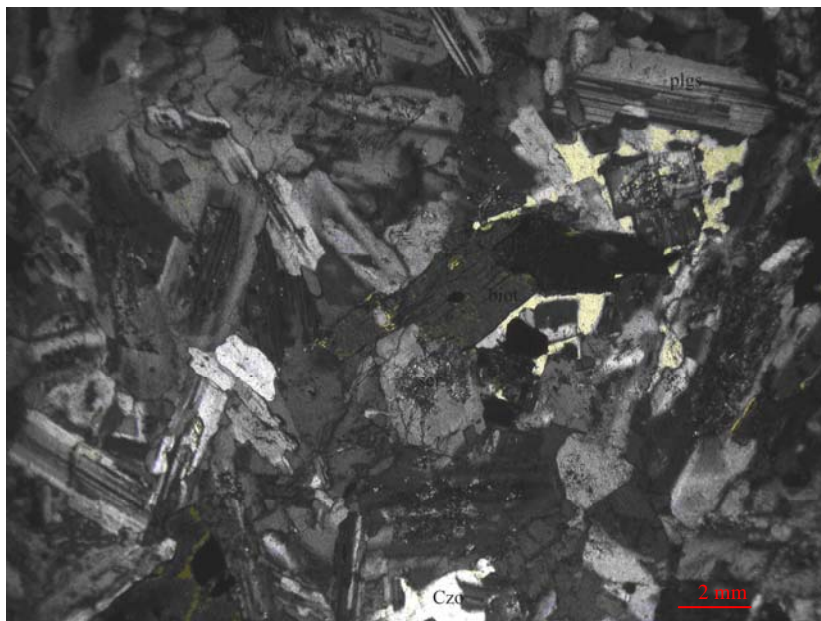


**Figura 12:** Diagrama con elementos traza en la figura superior y elementos de tierras raras en la figura de abajo, para siete muestras de pórfidos intrusivos. Los elementos traza indican moderada anomalía negativa de Nb y enriquecimiento relativo de tierras raras livianas, sugiere que los pórfidos se generaron en un ambiente de tras-arco (ausencia de anomalías de Eu). Valores Normalizados según Sun and McDonough (1989).

### **Rocas intrusivas (Batolito Cordón de las Bandurrias)**

Las rocas intrusivas que son parte del denominado Batolito Cordón de las Bandurrias afloran inmediatamente al oeste de la zona de estudio (Fig. 8), este extenso cuerpo tiene elongación norte-sur y cubre un área de 1750 m<sup>2</sup>. Especialmente están en contacto irregular N-S con rocas volcánicas y sedimentarias, que en depresiones y quebradas se encuentran sepultadas por las Gravas de Atacama (Mioceno). En la zona de contacto con las rocas volcánicas del Grupo Bandurrias se observa una zona discreta de esquistosidad irregular probablemente asociada a una falla (KP-09; Anexo I).

Al microscopio presentan textura hipidiomórfica, equigranular panidiomórfica (Muestra DAS-10, (Anexo I), Foto 1) están constituidas por cristales de plagioclasa de hasta 3 mm, biotitas euhedrales de hasta 3 mm de color café verdoso en cristales tabulares; ortoclasa sucia débilmente argilizada y cuarzo anhedral de hasta 1 mm, algunos minerales opacos reemplazan débilmente ferromagnesianos. En general son rocas de grano medio a grueso (Foto 2).

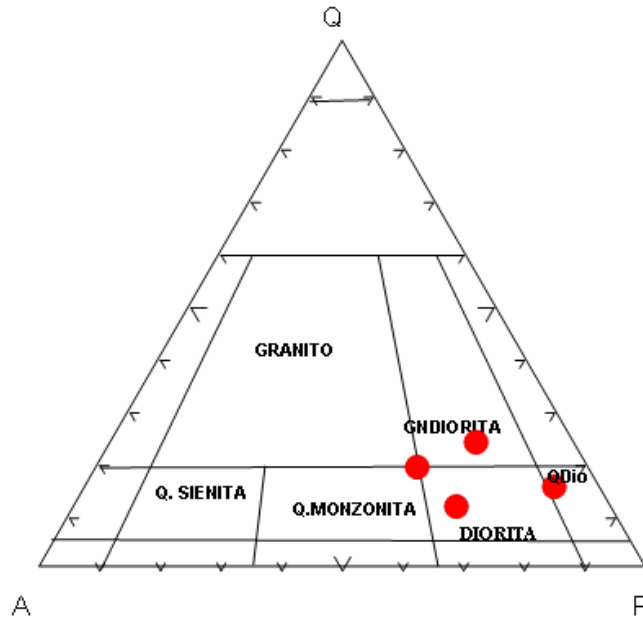


**Foto 2:** Granodiorita (Muestra DAS-10) Batolito Sierra de las Bandurrias, se observan cristales euhedrales de plagioclasa (40%), feldespato potásico (13%), cuarzo (28%), biotita (10%), minerales opacos (2%), débil a nula alteración de plagioclasas a arcillas y biotitas débilmente alteradas a cloritas.

## GEOQUIMICA

Cuatro muestras representativas de las rocas del batolito (MT-01, MT-05, KP-20 y KP-25) se han analizado por elementos mayores y traza (ver Tabla 2; Anexo 1; su ubicación geográfica en coordenadas UTM se presenta en la Tabla 1; Anexo 1).

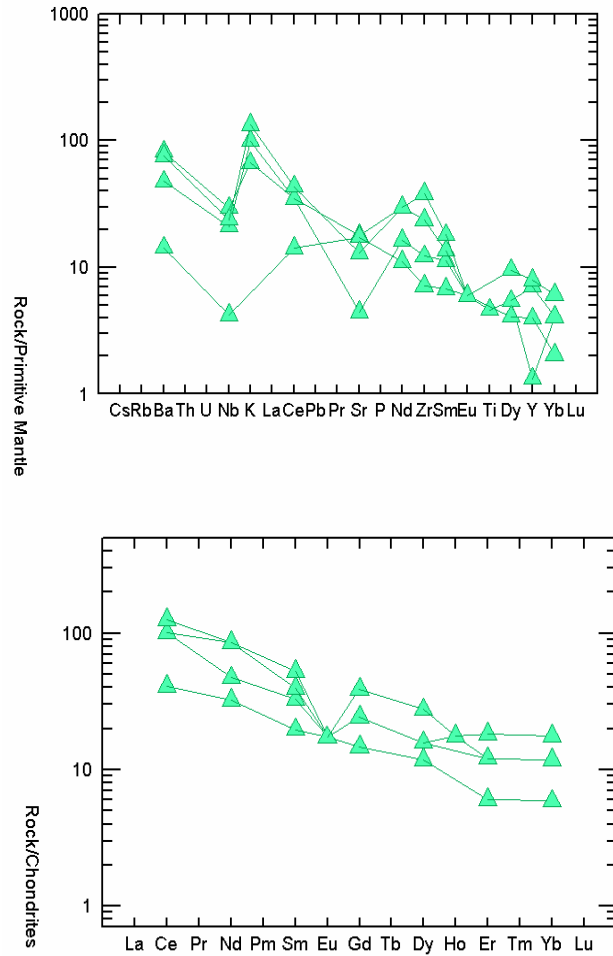
El ploteo de cuatro muestras de las rocas intrusivas del batolito sin alteración (Anexo I, Tabla 2) en la Figura 13, indica litología afín con dioritas, cuarzo dioritas, granodioritas a cuarzomonzonitas.



**Figura 13.** Diagrama QAP. Se muestra el ploteo de cuatro muestras de rocas intrusivas, según clasificación de las rocas que caen en el triángulo cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa, según la subcomisión sobre la sistemática de la clasificación de las rocas ígneas (Streckeisen, 1978).

La composición de los elementos traza de cuatro muestras mencionadas de rocas intrusivas son comparadas en la Figura 14, ésta indica una fuerte anomalía negativa de Nb y Sr y anomalías positivas en K y Zr.

Los patrones de elementos de tierras raras (REE), caracterizan un enriquecimiento monótono de elementos livianos y anomalías negativas de Eu. Se observa solo anomalías negativas de Nb, no existe anomalías de Ti. Tienen afinidad con un arco normal (Richard et al., 2001), el enriquecimiento relativo de tierras livianas y empobrecimiento en tierras raras pesadas, con anomalías de Eu (Fig. 12), pueden ser característica de fraccionamiento feldespatos desde magmas hidratados durante la diferenciación de estos magmas (Richard et al., 2001).



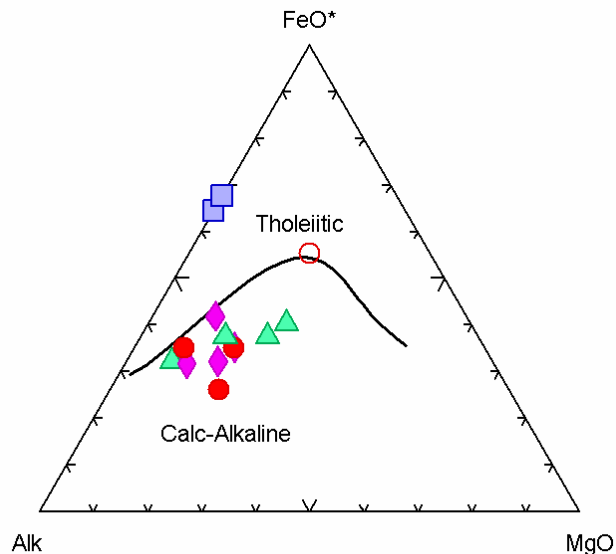
**Figura 14:** Diagrama con elementos traza en la figura superior y elementos de tierras raras en la figura de abajo para cuatro muestras de rocas intrusivas del Batolito de la Sierra Las Bandurrias. Los elementos traza indican moderada a fuerte anomalía negativa de Nb, Sr Indican afinidad con un ambiente de arco normal. Los elementos de tierras raras indican anomalía negativa de Eu, indica fraccionamiento de feldespatos desde magmas relativamente hidratados.

### DIQUES TARDÍOS

Diques andesíticos están emplazados en el pórfido Dos Amigos, se presentan como un enjambre moderado de rumbo N-S y manteos subverticales, afloran principalmente en la parte SE del rajo Dos Amigos (Fig. 8), presentan textura afanítica y son de color verde claro, tienen potencias variables de hasta 10 m.

## Contexto General

La combinación de elementos traza con su composición de elementos mayores de todas las muestras seleccionada de los diferentes tipos de roca analizada en la zona de estudio, soportan afinidad magmática calcoalcalina (Chappell and White 1974). Las muestras de rocas volcánicas indican afinidad toleítica.



**Figura 15:** Diagrama de Irvine y Baragar (1971) con resultados de multielementos de las muestras de los principales tipos de roca que afloran en la Zona Hidrotermal de Domeyko. Triángulos verdes (batolito), rombos lilas y círculos rojos (pórfidos), cuadrados celestes (rocas volcánicas) y circunferencia roja (dique).

De acuerdo a los datos analizados en este capítulo se sugiere para la zona de estudio, emplazamiento de rocas calcoalcalinas asociadas a un margen continental activo con subducción de corteza oceánica bajo el mismo, que incluyó una etapa inicial caracterizada por un sistema de arco magmático y cuenca de tras-arco con sedimentación marina durante el Jurásico y Cretácico inferior. La intrusión de pórfidos ocurrió en el extremo oriental del arco magmático Jurásico-Cretácico Inferior y posiblemente en condiciones afines a tras-arco.

### III. GEOCROLOGIA

Hasta la fecha las únicas dataciones radiométricas en la Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko, correspondían a las realizadas por Munizaga et al. (1985) por el método K-Ar. Dos muestras de roca total de la zona de Domeyko con alteración dieron edades imprecisas K-Ar de  $97\pm 20$  Ma y  $106\pm 10$  Ma. Además, los mismos autores reportaron una edad K-Ar en biotita de  $97\pm 3$  Ma para un intrusivo diorítico de la zona de Pajonales y una edad K-Ar en roca total alterada de  $97\pm 20$  Ma en la zona de la cuesta de Pajonales (unos 23 km al sur de Domeyko).

A fin de definir la relación temporal de rocas del batolito, pórfidos y alteración-mineralización. Se han realizado en total 15 dataciones, 5 mediante el método  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  en circones y 6 por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en mica hidrotermal (biotita y sericita), corresponden a los dos centros porfiríticos Tricolor y Dos Amigos, 1 muestra en la Brecha Marisol. También se ha analizado mediante el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , biotita magmática primaria para 2 muestras de rocas intrusivas que son parte del Batolito del Cordón las Bandurrias. Finalmente 1 muestra en biotita con el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  del pórfido Tricolor milonitizado, relacionado a un sistema de falla N-S.

La ubicación geográfica y descripción de las muestras con edades radiométricas nuevas, se presenta en la Tabla 1 (Anexo 1). A continuación documentamos la metodología de los métodos U-Pb en circones y  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  en biotitas y sericitas, los resultados obtenidos desde edades más antiguas a las más jóvenes respectivamente.

#### METODOLOGIA U-Pb

Los análisis U-Pb han sido realizados por el Dr. Víctor Valencia en el Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona en Tucson, EEUU utilizando el método de abrasión láser en un equipo de inducción de plasma con espectrómetro de masas multi-colector (LAM-ICP-MS). La metodología se detalla en Anexo II.

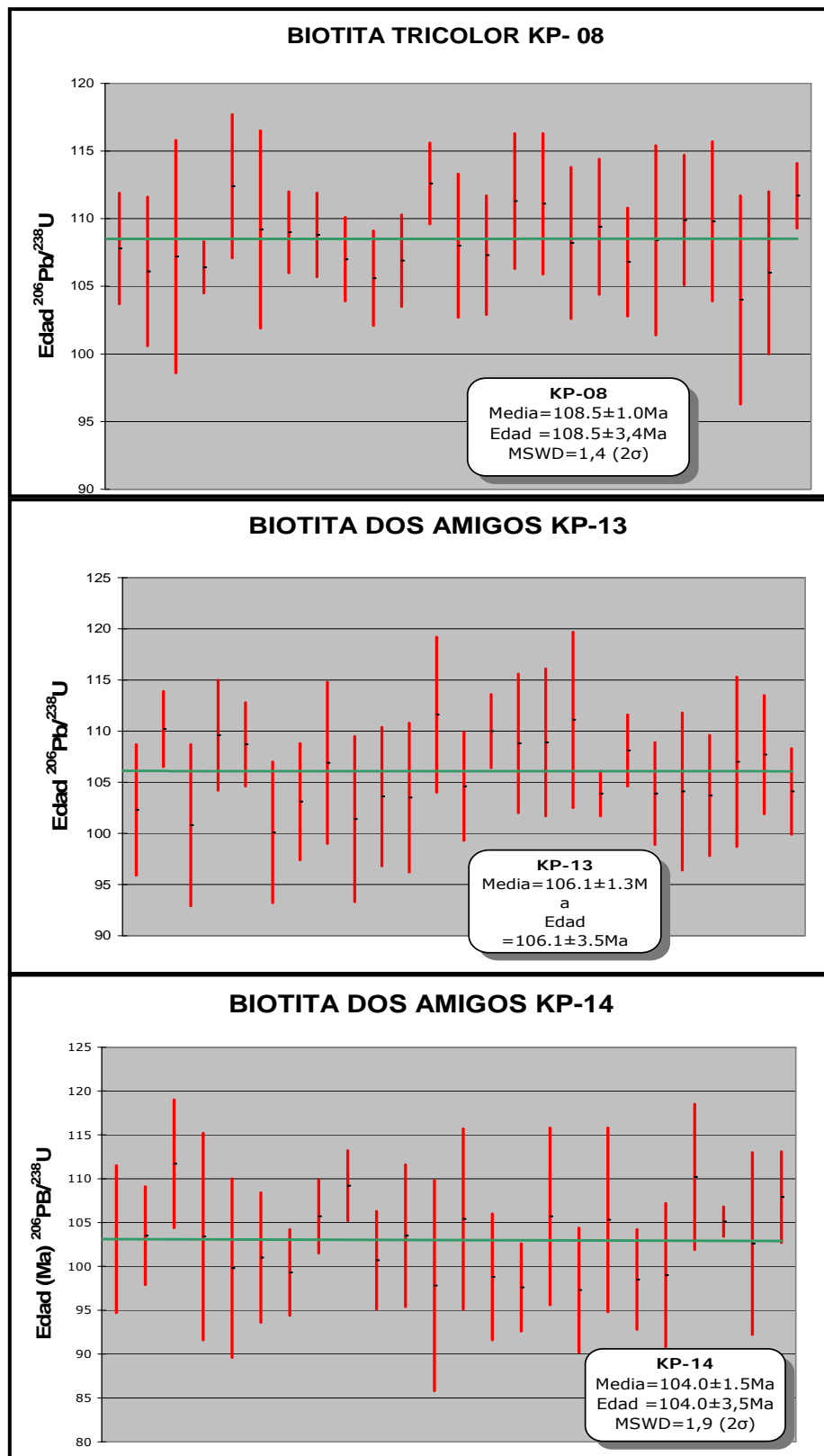
La datación  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  en circones, se realizó para los dos centros porfiríticos denominados Tricolor (KP-08), Dos Amigos (KP-13 y KP-14) y 2 muestras en roca intrusiva inalterada del Batolito del Cordón Las Bandurrias; una muestra en Zona de

Alteración de Domeyko (KP-25, se ubica 250m al oeste del contacto con el pórfido Tricolor) y otra muestra de roca intrusivo en la zona Pajonales (KP-20, ubicación descrita en párrafo anterior).

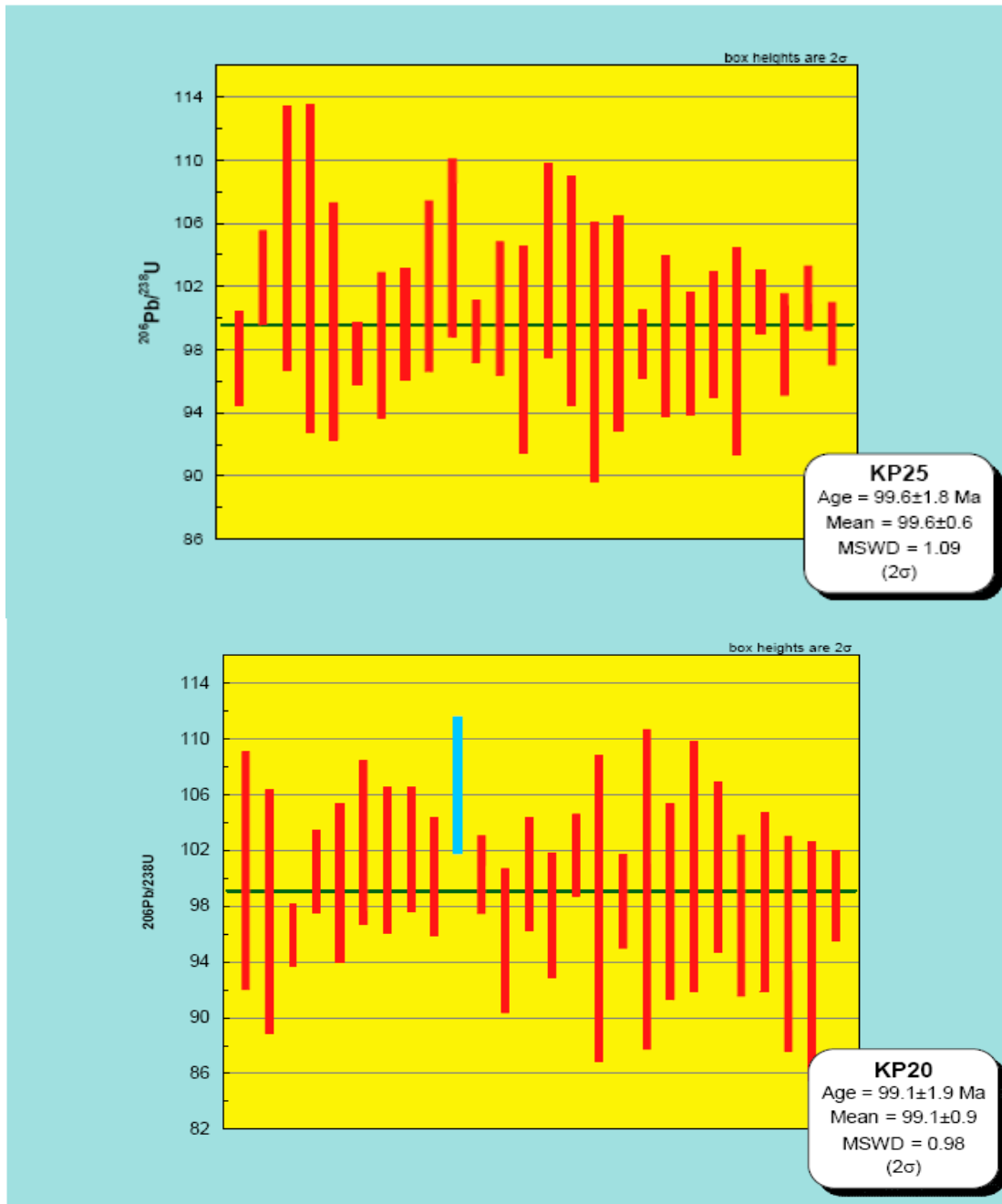
Las muestras KP-08 (Pórfido Tricolor) y KP-13 y KP-14 (Pórfido Dos amigos) indican edades U-Pb en circón de  $108.5 \pm 3.4$  Ma,  $106.1 \pm 3.5$  y  $104.0 \pm 3.5$  Ma respectivamente (Fig. 16). Estas edades son estadísticamente idénticas (dentro del rango de error analítico) y se interpretan como edad de cristalización de los pórfidos mineralizados Tricolor y Dos Amigos, dada la alta temperatura de cierre del circón para el sistema isotópico U-Pb ( $\sim 800^\circ$  C) y su inalterabilidad (Ej. Davis y Krogh, 2000; Cherniak y Watson 2000 y referencias contenidas), Consecuentemente, estos pórfidos alterados y mineralizados se emplazaron en el Albiano, de acuerdo a la tabla del tiempo geológico de la Comisión Internacional de estratigrafía (2005)

Las muestras KP-25 y KP-20 (Pajonales) pertenecen a rocas intrusivas del Batolito del Cordón las Bandurrias, indican edades U-Pb en circón de  $99.6 \pm 1.8$  Ma,  $99.1 \pm 1.9$  Ma respectivamente (Fig.17). Ambas edades son idénticas y se interpretan como edades de cristalización del Batolito, evento que ocurrió a comienzos del Cenomaniano. Es decir, con posterioridad al emplazamiento de los pórfidos que poseen alteración y mineralización. Esto es consistente con el hecho de que las rocas de batolito están esencialmente inalteradas. Las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de las mismas muestras (KP-25 y KP-20, Fig. 21 y cuadro resumen) dieron edades de  $96.9 \pm 0.9$  Ma (promedio) y  $94.8 \pm 1$  Ma (plateau). Estas edades son más jóvenes que las obtenidas por el método U-Pb, pero se alcanzan a traslapar en el rango de error analítico (KP-25) y lo anterior es consistente con la temperatura de cierre inferior de la biotita ( $280^\circ \pm 40^\circ\text{C}$ ) por lo que registra el enfriamiento de la roca y no su cristalización.





**Figura 16:** Diagrama de barras para dataciones U-Pb en circón de pórfidos, estas edades se traslapan dentro de los rangos de error en el nivel 2 sigma, según Anexo II. Estas edades se interpretan como edades de cristalización de los pórfidos.



**Figura 17:** Diagrama de barras para dataciones U-Pb en circón del Batolito de la Sierra Las Bandurrias. Estas edades se traslapan dentro de los rangos de error a nivel de 2-sigma, Anexo II. Estas edades se interpretan como edades de cristalización del batolito. El análisis en celeste no está incluido en el promedio.

#### METODOLOGIA $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .

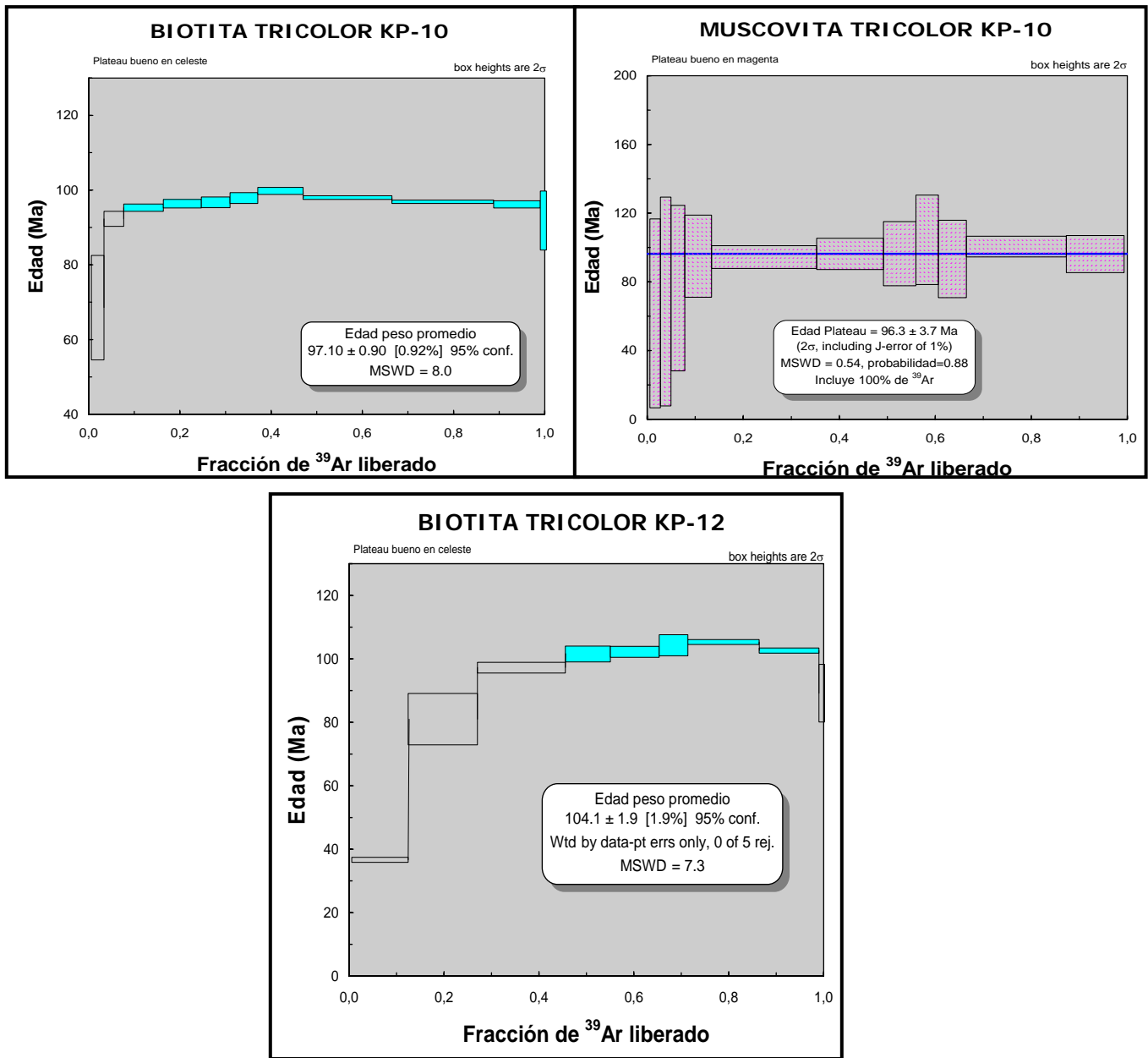
La datación con el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en mica hidrotermal (biotita y sericita), se ha realizado para los centros porfíricos Dos Amigos (KP-12, KP-14 y KP-16) y Tricolor (KP-10, KP-12 y KP-09, roca foliada), en la Brecha Marisol (Fig. 2, KP-26). También en

biotita primaria en rocas intrusivas del Batolito Cordón las Bandurrias KP-25 y KP-20 y de la Zona de Alteración de Domeyko y Zona de Pajonales respectivamente. El análisis se realizó en la Universidad de Stanford, usando el procedimiento de Marsh et al (1997). El detalle se da en el Apéndice II. Los resultados de las dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , en los centros porfiríticos y una biotita con efectos miloníticos en pórfido Tricolor quedan indicadas en el siguiente cuadro. Se muestra espectros de cada muestra para pesos promedio en las Figuras 18, 19 y 21.

Tabla. Según estudios con el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , se muestra la edad, el tipo de isocrona y ubicación de las muestras datadas.

Muestra	Edad (Ma)	Tipo	Isócrona (Ma)	Ubicación
KP-10 muscovita	96.3 ± 3.7	Plateau	97.8 ± 1.2	Tricolor
KP-10 biotita	97.1 ± 0.9	Media Ponderada	97.4 ± 1.1	Tricolor; gradiente 95 – 99 Ma
KP-12 biotita	104.1 ± 1.9	Media Ponderada	102.3 ± 9.7	Tricolor; gradiente 97 – 105 Ma
KP-26 muscovita	85.8 ± 1.2	Media Ponderada	88.6 ± 9.0	Tricolor
KP-13 biotita	96.0 ± 0.7	Media Ponderada	96.3 ± 1.5	Dos Amigos; perturbado
KP-14 biotita	89.1 ± 2.0	Media Ponderada	89.4 ± 2.3	Dos Amigos; perturbado
KP-16 sericita	96.1 ± 1.0	Plateau	96.2 ± 0.5	Dos Amigos
KP-09 biotita	105.4 ± 3.3	Media Ponderada	111 ± 28Ma	Milonita Tricolor
KP-20 biotita	94.8 ± 1.0	Plateau	94.5 ± 0.8	Pajonales, Batolito
KP-25 biotita	96.9 ± 0.9	Media Ponderada	95.2 ± 1.3	Tricolor, Batolito

Las dataciones para la brecha con matriz de turmalina, presenta un espectro muy irregular (Figura 20). Las dataciones para rocas intrusivas del Batolito Sierra Las Bandurrias, presenta un espectro irregular (Figura 21).



**Figura 18:** Espectro de edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  para el centro porfirítico Tricolor biotita y sericita.

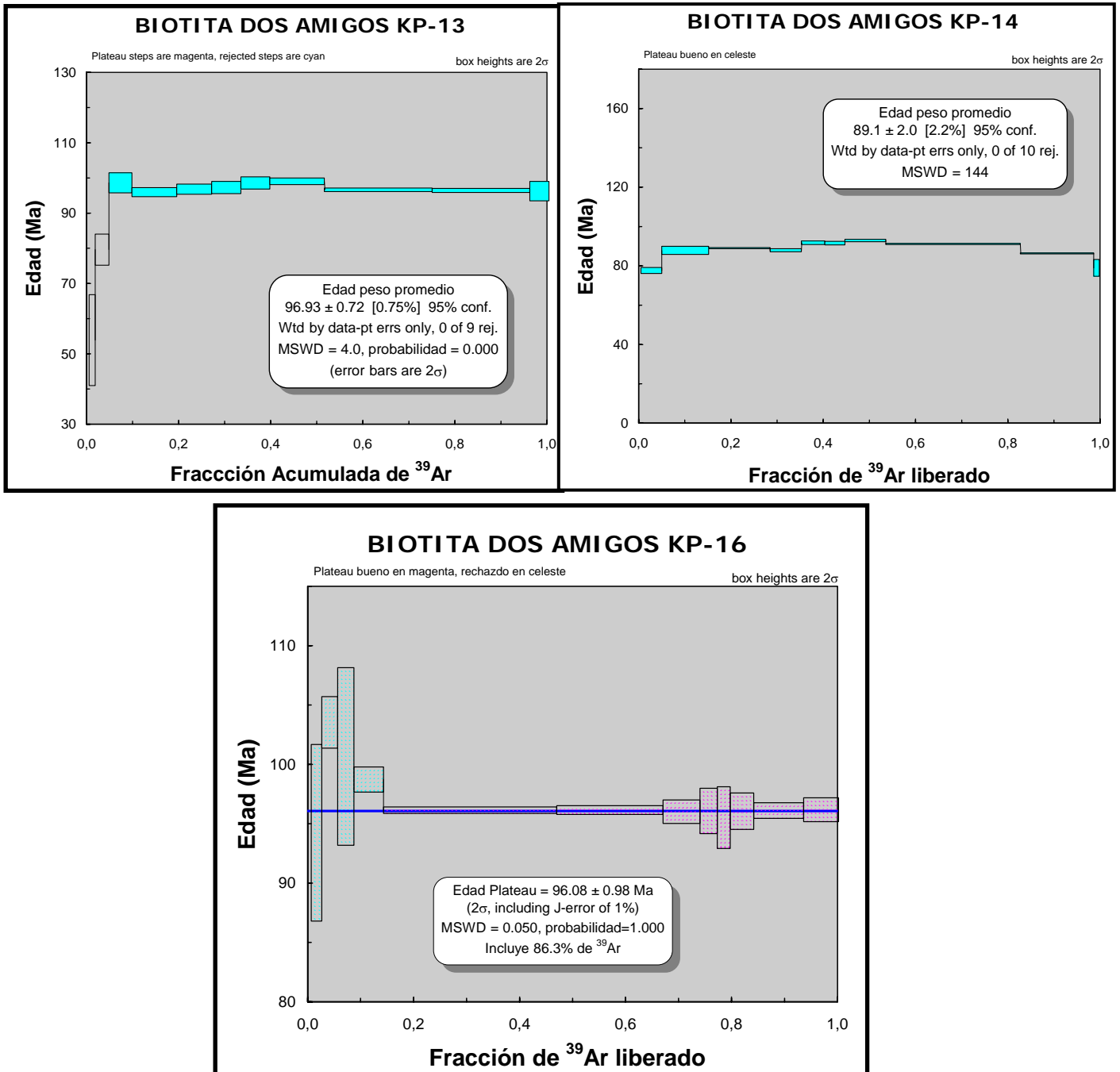
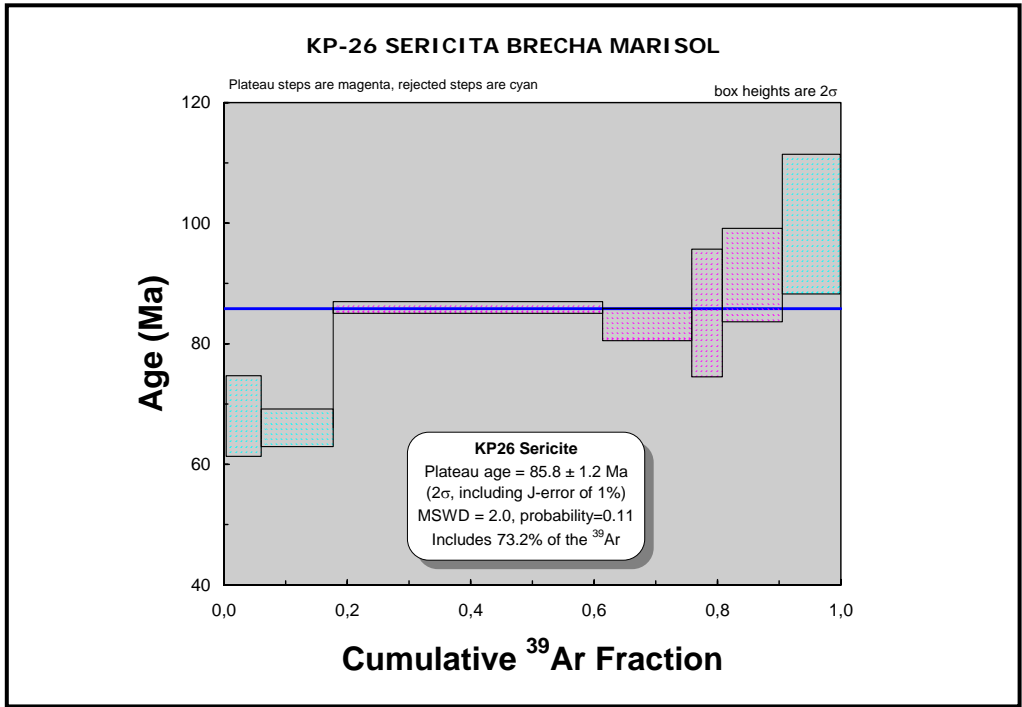
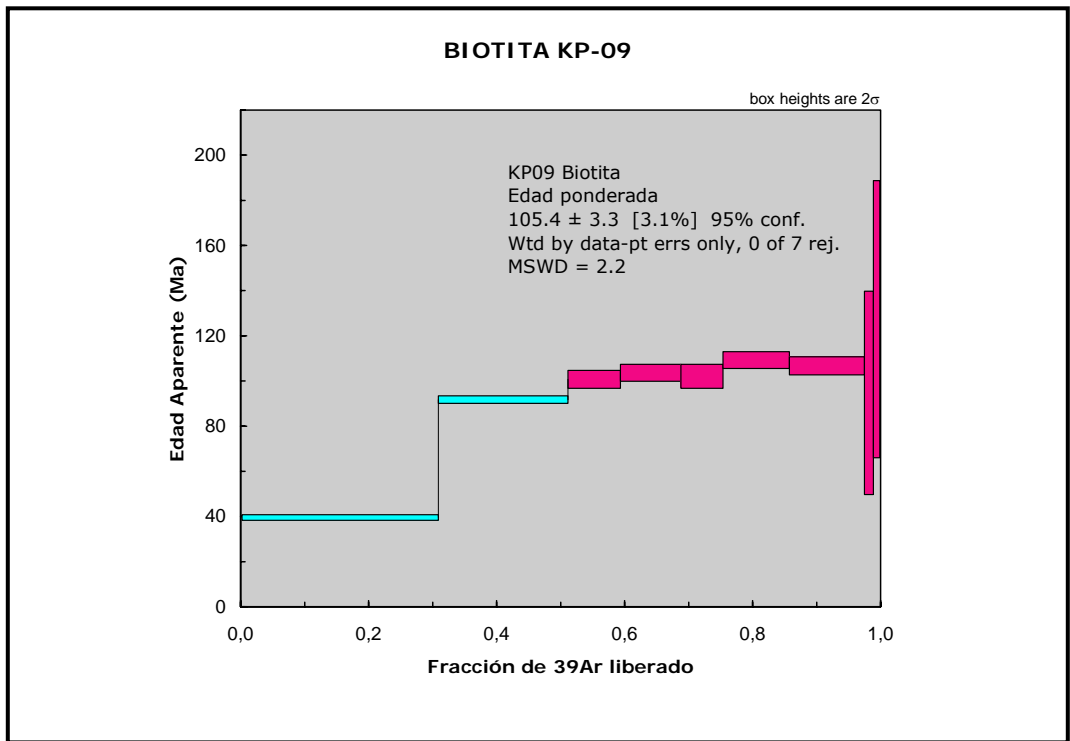


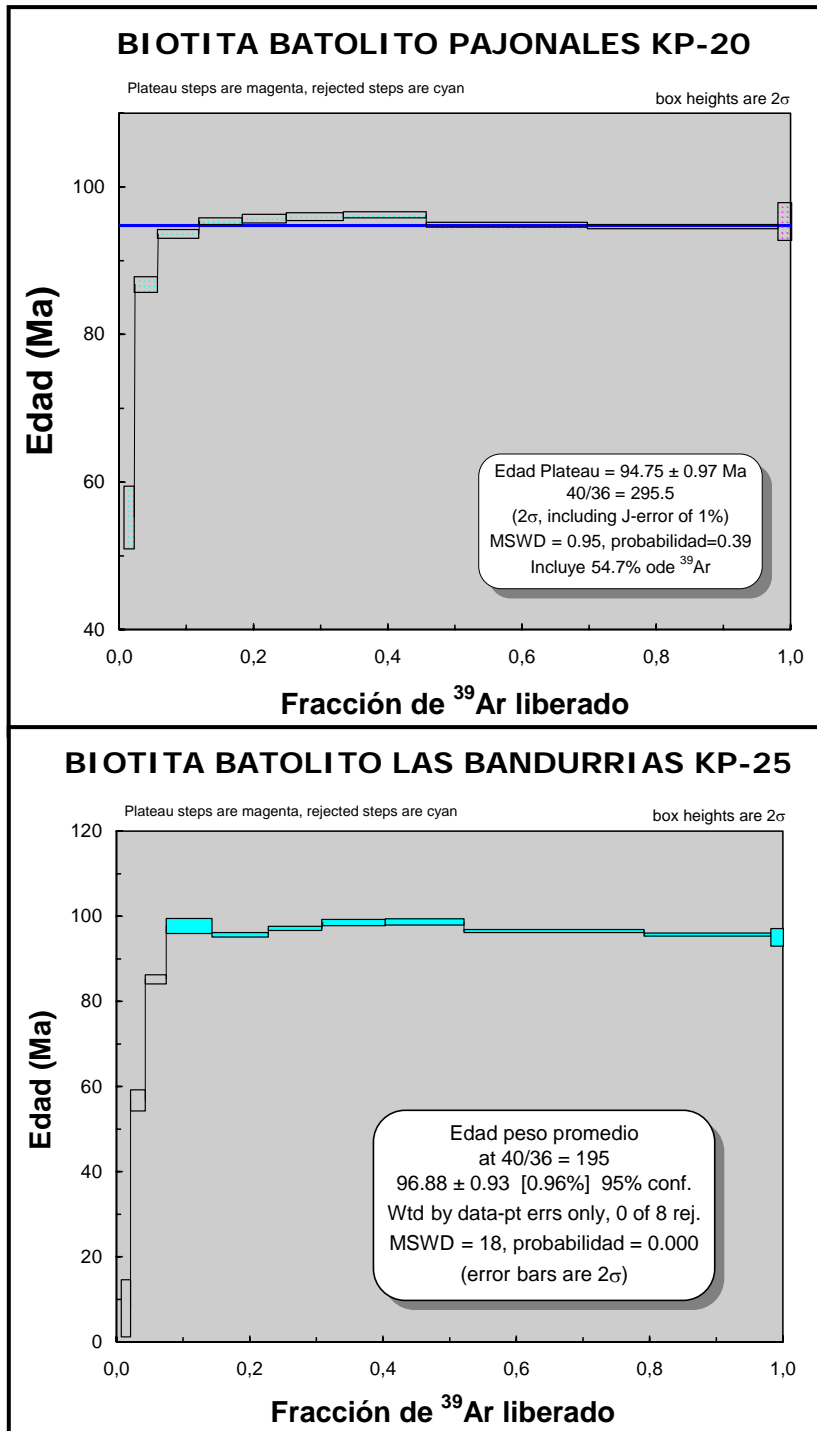
Figura 19: Espectro de edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  para el centro porfírico Dos Amigos en biotita.



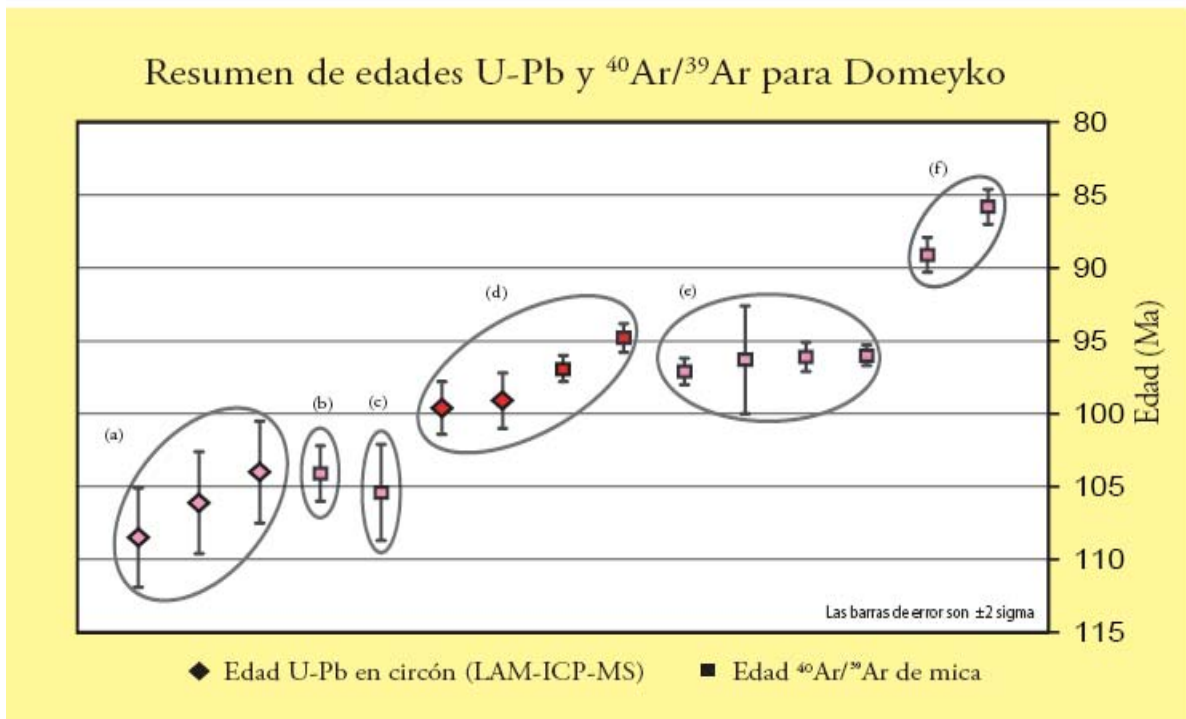
**Figura 20.** Espectro de edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en brecha con matriz de turmalina (Brecha Marisol).



**Figura 21:** Espectro de edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en biotita del pórfido Tricolor con efectos miloníticos asociado a una falla.



**Figura 22.** Espectro de edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  para rocas intrusivas que pertenecen al Batolito Sierra de las Bandurrias.



**Figura 23.** Edades radiométricas para la Zona de Alteración de Domeyko: **(a)** Edades de cristalización (U-Pb en circón) de los Pórfidos Dos Amigos y Tricolor; **(b)** Edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de biotita hidrotermal (alteración potásica); **(c)** Edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de biotita del Pórfido Tricolor milonitizado (deformación de cizalle); **(d)** Edades de cristalización (U-Pb en circón) y enfriamiento ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en biotitas magmáticas) del Batolito de Sierra de las Bandurrias; **(e)** Edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de micas hidrotermales (biotita y sericita) de los pórfidos Dos Amigos y Tricolor rejuvenecidas por efecto termal del batolito o neoformadas durante su intrusión; **(f)** Edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de biotita de Dos Amigos y sericita de Brecha Marisol que pueden representar un evento termal posterior o estar parcialmente rejuvenecidas por haber perdido  $^{40}\text{Ar}$  radiogénico por efectos de alteración supergena.

## CONTEXTO GENERAL.

Las dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  con extracción por pasos de micas revelaron en general espectros de edades aparentes irregulares, los que evidencian, en general, perturbaciones del sistema isotópico K-Ar de las muestras (Fig. 23). Una excepción lo constituye la muestra KP-16 de sericita de la mica Dos Amigos que define un plateau  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $96.08 \pm 0.98$  Ma y una muestra de sericita Tricolor que define un plateau  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $96 \pm 3.7$  Ma. Sin embargo, estas últimas edades son significativamente más jóvenes que la edad de cristalización de los respectivos pórfidos que contienen la sericita y son comparables a las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y U-Pb obtenidas en el Batolito de la Sierra de las Bandurrias adyacente a los pórfidos. Consecuentemente, se infiere que la



sericita (temperatura de cierre de  $\sim 300^{\circ}\text{C}$ ) registró el evento termal correspondiente al emplazamiento del Batolito, aunque no se puede descartar que este mineral se haya formado durante este evento. Esto se reafirma con las edades de biotitas hidrotermales, en las cuales una muestra de andesita biotitizada de la zona de Tricolor (KP-12) produjo una edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , promedio de  $104 \pm 1,9$  Ma comparable a las edades U-Pb de los pórfidos intrusivos y sugerente que la alteración potásica estuvo ligada al emplazamiento de los pórfidos. Además dicha muestra (KP-12) revela un espectro de edades con gradiente de 97 a 105 Ma, que es típico de pérdida parcial de  $^{40}\text{Ar}$  radiogénico, donde la edad mayor representa la edad original registrada por la mica y la de 97 Ma al evento térmico que provocó la desgasificación parcial del mineral. Algo similar se observa en el espectro de la biotita (KP-10) de Tricolor (Fig. 23). La muestra KP-09 es de una biotita secundaria de el pórfido Tricolor con efectos miloníticos asociado a una Falla, indica una edad en  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $105.4 \pm 3.3$  Ma promedio, esta edad coincide con la edad U-Pb de cristalización de los pórfidos, lo que sugiere que la falla es parte del primer evento hidrotermal y que estuvo activa cuando se emplazaron los pórfidos. Las muestras de biotita KP-14 (Dos Amigos) y la de sericita KP-26 (Brecha Marisol) dieron espectros irregulares con edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  significativamente más jóvenes de  $89.1 \pm 2.0$  Ma y  $85.8 \pm 1.2$  Ma respectivamente (Fig. 23). La muestra KP-26 de sericita proviene del cuerpo de brecha con una matriz de turmalina y probablemente ambas edades representen un evento termal más tardío con respecto a las otras micas hidrotermales (Fig. 23). Pero, también puede ser simplemente pérdida de Ar y no tener significado geológico.

En consecuencia el conjunto de edades radiométricas en la Zona de Domeyko revelan una historia compleja, que incluye el emplazamiento de los pórfidos Dos Amigos y Tricolor en el Albiano con el desarrollo de alteración hidrotermal y fallamiento asociado a los mismos. La cristalización y enfriamiento del Batolito adyacente por el oeste a la zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko ocurrió en el Cenomaniano, produciendo un rejuvenecimiento (resetting) total o parcial de las micas de los depósitos. Aunque no se puede descartar la formación de minerales hidrotermales relacionados a este evento. Cabe señalar, que los eventos coinciden con las edades K-Ar obtenidas por Munizaga et al (1985), pero la poca precisión de estas últimas, no permitía una identificación más exacta de los eventos termales. Finalmente las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de 89 y 86 Ma parecen

sugerir un tercer evento termal del Coniaciano en la zona de la brecha Marisol (Fig. 23) y alrededores atribuible, a la actividad hidrotermal ligada al complejo de brechas. Sin embargo, estas edades más jóvenes pueden deberse a pérdida parcial de Ar de las muestras y no tener significado geológico.

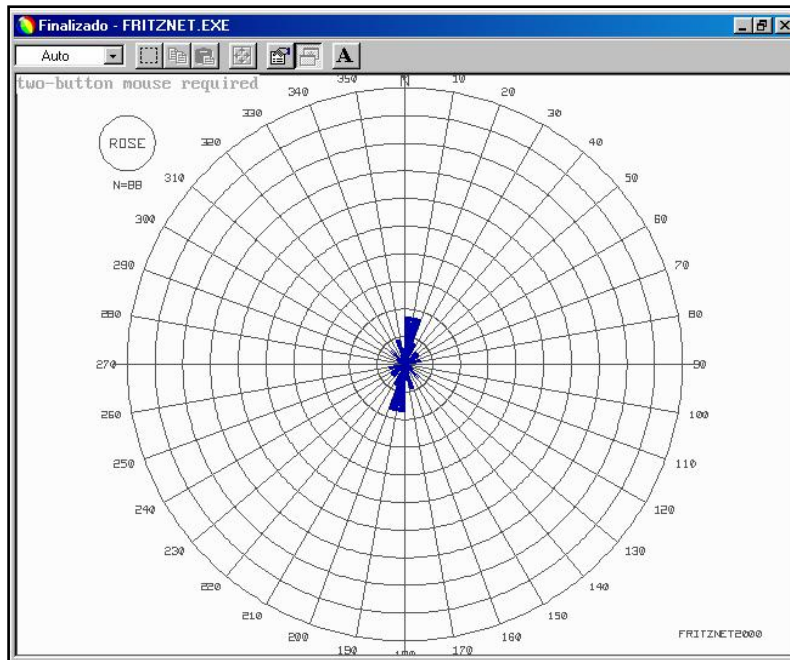
#### **IV. ESTRUCTURAS EN LA ZONA DE ALTERACIÓN DE DOMEYKO**

En la Zona de Alteración de Domeyko, principalmente en el rajo de la mina Dos Amigos se realizaron mediciones de rumbo y manteo de fallas, fracturas y vetillas de cuarzo mineralizadas que forman un stockwork. Se han identificado fallas inversas, normales y transcurrentes de acuerdo a sus indicadores cinemáticos según Pettit (1987), Las vetillas de cuarzo se han diferenciado según la definición de Gustafson y Hunt (1975) en el yacimiento porfirítico Dos Amigos (ver su descripción en el capítulo de Alteración Hidrotermal).

El análisis estadístico mediante el software Stnet en rosetas, permitió definir cuatro sistemas de fallas, los que en su mayoría tienen evidencias de movimiento normal. Estos sistemas son de rumbos N20°W, N60°W, N20°E y N70°E con manteos subverticales (Fig. 8 y Fig. 24). El conjunto de fallas que están en el rango N20°W a N20° E con manteos de 70-85°E es el mejor definido, ya que sus estructuras tienen continuidad longitudinal a lo largo de la zona de alteración hidrotermal (Foto 3), los anchos de las zonas de falla son irregulares y alcanzan hasta 3 metros localmente. Los indicadores cinemáticos en estas fallas indican que tuvieron movimiento normal por lo menos en su última etapa asociada temporalmente a la mineralización, los desplazamientos están en el orden de cm hasta 1m como máximo. Ocasionalmente en estas fallas se observa vestigios de movimiento inverso-sinistral obliterado por el último movimiento normal.

El sistema de falla con rumbo N70°E y manteos de 70-85° S es de segundo orden y está representado por una falla individual con continuidad longitudinal de hasta 500 m. Los indicadores cinemáticos, permiten asignarle movimiento en el rumbo de tipo dextral. Esta falla corta a todos los otros sistemas y controla el stock porfirítico Dos Amigos en el lado

norte (Figura 8). Por su parte, el sistema de fallas N60°W con manteos subverticales tiene escasa continuidad, pero con mayor densidad respecto a los otros sistemas de fallas

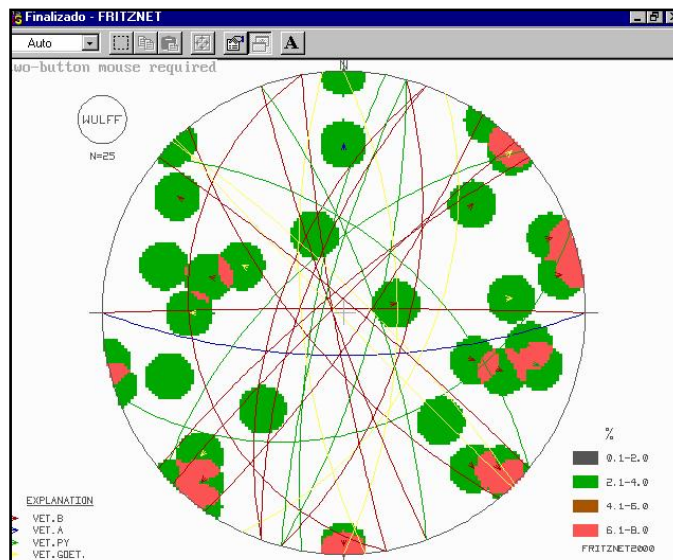


**Figura 24:** Se observa en el diagrama tipo roseta los diferentes sistemas de fallas, la predominante es N10°E, los sistemas N 20°W, N60°W, N20°E, N70°E son de segundo orden.

Los diferentes tipos de vetillas tipo A, B y D según Gustafson y Hunt (1975) ploteados en el diagrama Wulff, definen un sistema de vetillas polidireccionales formado un stockwork en el sistema porfirítico Dos Amigos. Aunque, estadísticamente el mayor porcentaje de vetillas se asocia al sistema principal de rango N10°W a N10°E (Fig. 25).

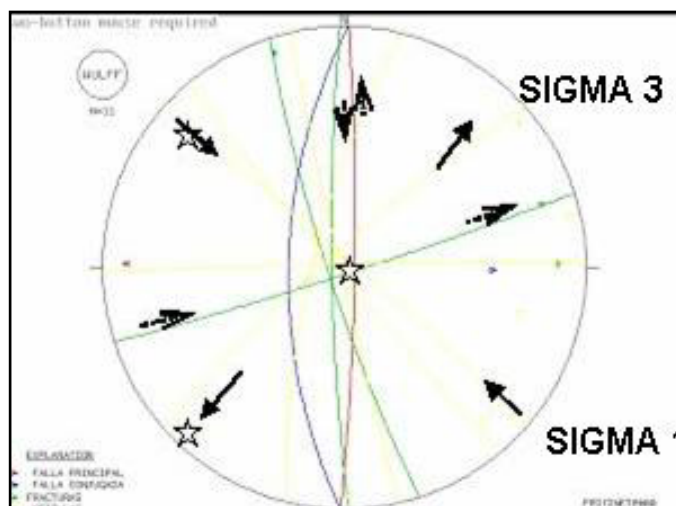


**Foto 3.** Se observa fallas N10°E/84°S con continuidad a lo largo del rajo Dos Amigos, la falla esta rellena con piritacalcosina en color gris.



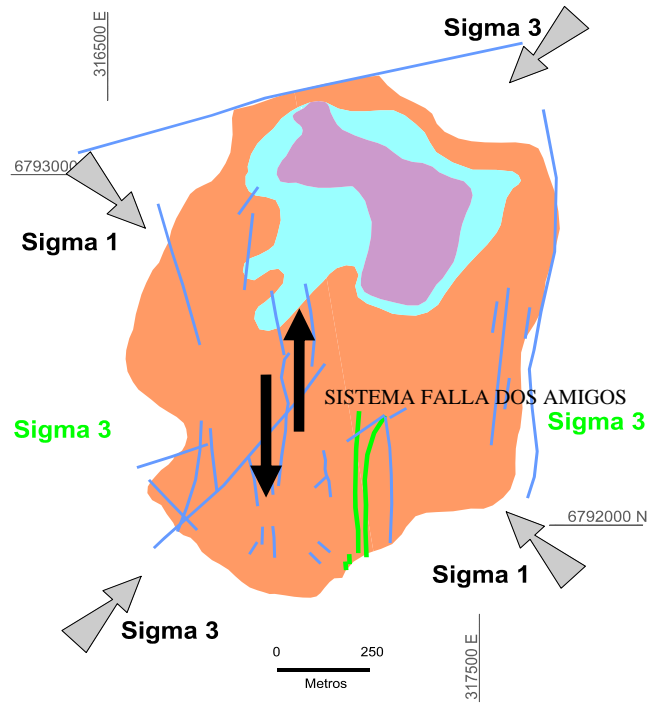
**Figura 25.** El diagrama muestra tipos de vetillas de cuarzo Tipo A, B y D (Vetillas de piritita), muestra un control principal N10°W a N10°E, menos frecuentes son los sistemas NE, NW y EW.

El análisis estadístico de acuerdo al mayor porcentaje de ocurrencias y relaciones observadas en el rajo Dos Amigos, permiten definir una falla principal de rumbo N10°E y manteo 80°W (tiene mayor continuidad espacial y esta mejor definida, Foto 3), un sistema subordinado de rumbo N25°W con manteo 88°W y un sistema de vetillas N-S con manteo 88°E. El ploteo de las tres estructuras mencionadas, se interceptan en un punto y definen un sistema Riedel y nos permite el cálculo de paleoesfuerzos para el sistema Porfirítico Dos Amigos (Fig. 26).



**Figura 26.** Se observa que la falla principal, fracturas y mayor sistema de vetillas se interceptan en un punto. Nos permite definir el sistema Riedel y el cálculo de paleoesfuerzos para el sistema mineralizado.

Mediante el análisis de paleoesfuerzos. Se infiere que la falla principal es parte de un sistema de falla mayor de carácter regional que en este estudio, se denomina Sistema de Falla Dos Amigos. Esta falla tiene rumbo N10°E y manteo promedio 80°-85°NW y tuvo movimiento sinistral (Fig. 27; Foto 3). Apoya esta interpretación las foliaciones que se observan en el pórfido Tricolor (Muestra KP-09, Anexo 1), con milonitización y neoformación de biotita, la que ha sido datada.



**Figura 27:** Se muestra el Sistema de Falla Dos Amigos N10°E con movimiento sinistral. Según el diagrama de paleoesfuerzos se puede postular control del emplazamiento del Pórfido Dos Amigos.

## INTERPRETACIÓN GENERAL

En general el conjunto de fallas N10°W a N10°E con movimiento sinistral, denominado Sistema de Falla Dos Amigos que está expuesto, principalmente en el rajo abierto Dos Amigos (Fig. 8 y 27, Foto 3). Afecta rocas volcánicas de el Grupo Bandurrias (edad Neocomiana), rocas porfíricas (108 Ma edad máxima de los centros porfíricos), rocas intrusivas (96 Ma). Sin embargo a los 85 Ma de años que es la edad para la Brecha con matriz de turmalina brecha Marisol no la afecta (Fig. 8 y Fig. 27) (las edades han sido definidas en Capítulo Geocronología). Por lo tanto, se postula que el Sistema de Falla Dos Amigos, para la Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko, estuvo activo desde tiempos Neocomianos hasta los 96 Ma Por lo menos. La biotita del pórfido Tricolor milonitizado (KP-09) dio una edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $105.4 \pm 3.3$  Ma, lo que sugiere que el cizalle sinistral estaba activo cuando se emplazó el pórfido.

Los antecedentes cinemáticos y cronológicos de la Falla Dos Amigos son coincidentes con los establecidos por otros autores para el Sistema de Falla de Atacama (Ej. Brown et al., 1933; González, 1999; Scheuber y González, 1999). Sin embargo el Sistema de

Falla Dos Amigos se localiza 15 km al este de la traza de la falla Romeral de Emparán y Pineda (1999). Lo anterior puede significar que el Sistema de Falla Dos Amigos puede corresponder a una estructura subsidiaria del Sistema de Falla Atacama localizada más al este, pero también puede ser la prolongación meridional del hipotético sistema de falla de carácter regional definido por Taylor et al.,(1998) y denominado Zona de Falla del Valle Central (CVFZ), el cual de acuerdo a estos autores empalma con un sistema de fallas de rumbo noroeste denominado Sistema de Falla de la Cordillera de la Costa y en conjunto formarían un hipotético duplex en la Cordillera de la Costa en el norte de Chile (Fig. 3).

## **V. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL**

En el área de estudio, la alteración hidrotermal de las rocas, cubre una extensión de 5,5 km x 1,5 km con elongación mayor norte-sur. Afectó en mayor grado rocas de los centros porfíricos Tricolor y Dos Amigos, la Brecha Marisol y rocas volcano-sedimentarias del Grupo Bandurrias (Fig. 8 y Fig. 26). En superficie aflora como una zona de rocas blanqueadas con pátinas marrones y rojizas de limonitas y hematita que incluye distintos tipos de alteración hidrotermal.

La descripción en términos de alteración intensa, moderada y débil se usa, para describir megascópicamente las rocas. Alteración intensa se refiere a rocas cuya textura ha sido completamente obliterada por la alteración hidrotermal, a excepción de cristales de cuarzo anhedrales y algunos relictos de cristales de plagioclasa primarios que se han preservado en roca alterada. Alteración moderada se refiere a las rocas, donde la alteración hidrotermal modificó la composición de granos de minerales individuales, pero la textura principal de la roca todavía se puede reconocer. El término de alteración débil, se refiere a rocas que conservan sus características texturales y mineralógicas primarias, pero con algunos efectos de alteración reconocidos bajo una lupa.

El grado de alteración gradada del centro hacia los bordes externos de intensa a débil. El límite de alteración al oeste se interrumpe en contacto irregular. En la parte sur (Zona

Tricolor) por el Sistema de falla Dos amigos y más al norte con rocas intrusivas inalteradas del Batolito Sierra de Las Bandurrias (Figura 8).

El estudio de vetillas Tipo A, B y D se realizó de acuerdo a la nomenclatura de Gustafson y Hunt (1975), las vetillas tipo M de acuerdo a la nomenclatura de Arancibia y Clark (1996).

La distribución e interpretación espacial y temporal de vetillas y tipos de alteración, se sustentan en evidencias de relación de corte y ensambles de superposición y/o reemplazo de texturas de mineral.

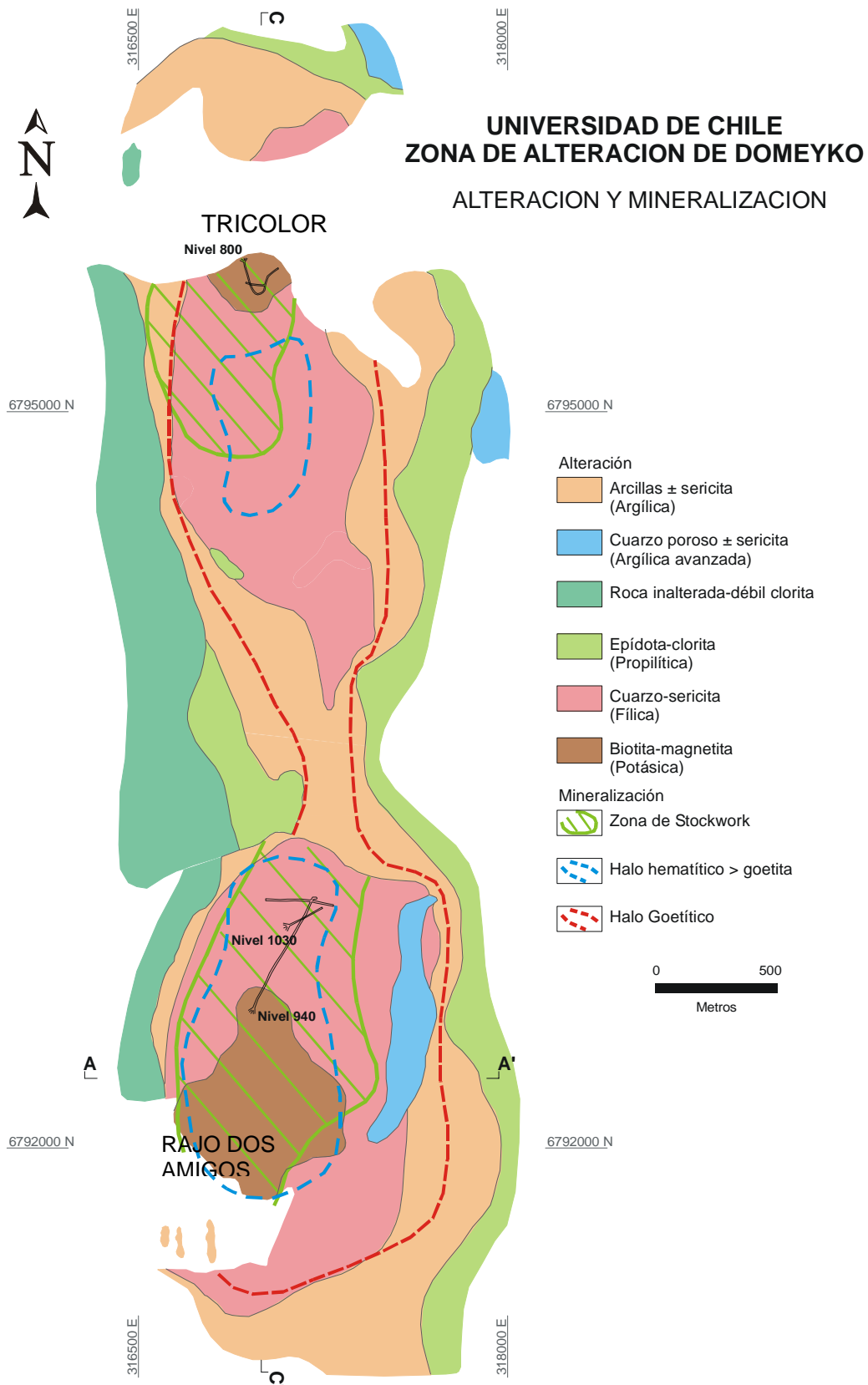
## **V.1 TIPOS DE ALTERACION**

### **ALTERACION POTASICA (BIOTITA-MAGNETITA)**

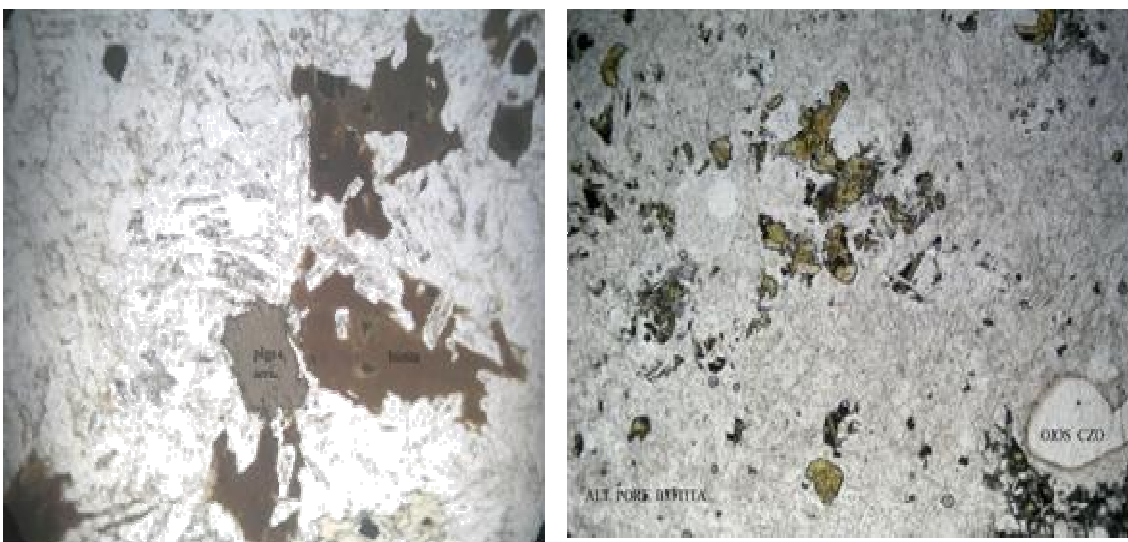
Afecta específicamente a los centros porfiríticos Dos Amigos y Tricolor que se ubican en el lado sur y norte de la zona de estudio respectivamente (Fig. 2, Fig. 28). Las zona con este tipo de de alteración presentan formas irregulares con elongación mayor N-S. En el centro porfirítico Dos amigos cubre un área de 1 x 0,6 km, en Tricolor de 0,6 x 0,4 Km. Los minerales esenciales que caracterizan a esta alteración son biotita, magnetita y en menor grado feldespatos potásicos; es una alteración que oblitera parcial a totalmente la roca (Anexo I, descripción petrográfica de secciones delgadas).

La biotita secundaria de grano fino (hasta 0,4 mm) se sobrepone a la mineralogía primaria formando texturas de relleno intersticial y de reemplazo (Foto 4). Reemplazó parcialmente plagioclasas y completamente anfíbulas primarias, localmente se observa clorita a su vez como reemplazo de biotitas (Foto 4). Los ojos de cuarzo mantienen su textura original (Foto 2 y 4). La masa fundamental corresponde a un entrecrecimiento microcristalino de cuarzo, biotita secundaria y en menor grado feldespatos potásicos (Foto 4). En el sector de Tricolor esta alteración afecta también a rocas volcánicas andesíticas en las que existe una biotitización completa de la matriz en un halo irregular expuesto en unos pocos metros.





**Figura 28.** Se muestra plano de alteración y mineralización de la Zona Hidrotermal de Domeyko.



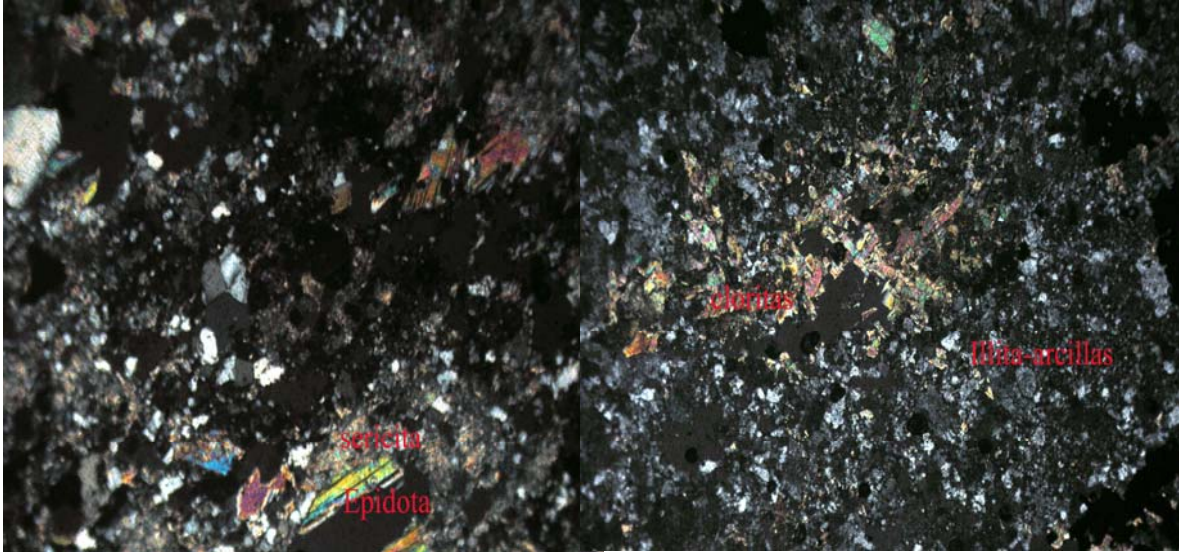
**Foto 4:** 30X. Alteración potásica del pórfido Dos Amigos. Se observa biotita secundaria fina intersticial, débil reemplazo de plagioclasas por biotita algunos ojos de cuarzo, cloritas alterando débilmente biotita

#### ALTERACIÓN PROPILITICA.

Afecta principalmente rocas volcánicas de la Formación Bandurrias (Fig. 28). Se caracteriza por presentar las rocas de color verde a verde oscuro, corresponde un halo envolvente irregular de 4 x 0,5 km<sup>2</sup> que rodea los centros porfiríticos Dos Amigos y Tricolor con alteración potásica. El ensamble epidota, clorita y calcita caracteriza esta alteración y se distribuye en vetillas y cristales diseminados en la roca, el reemplazo de minerales primarios es frecuente.

Las cloritas se presentan en cristales euhedrales en el rango de 0,2 a 0,7mm, reemplazan parcialmente cristales de plagioclasas y en menor grado biotita (Foto 5). La epidota se presenta en cristales euhedrales de hasta 0,5mm, reemplaza plagioclasas parcialmente, a veces se observa como halos en vetillas de pirita, la calcita se observa megascópicamente en vetillas y en el borde más externo de este halo propilítico.

La distribución de minerales en el halo propilítico se distribuyen en tres subhalos que desde el interior hacia el exterior predomina la clorita, epidota y calcita respectivamente. En algunos casos se sobrepone la alteración Supergena como parches de arcilla tipo montmorillonita (ver tabla de difracción de rayos X, Anexo III).



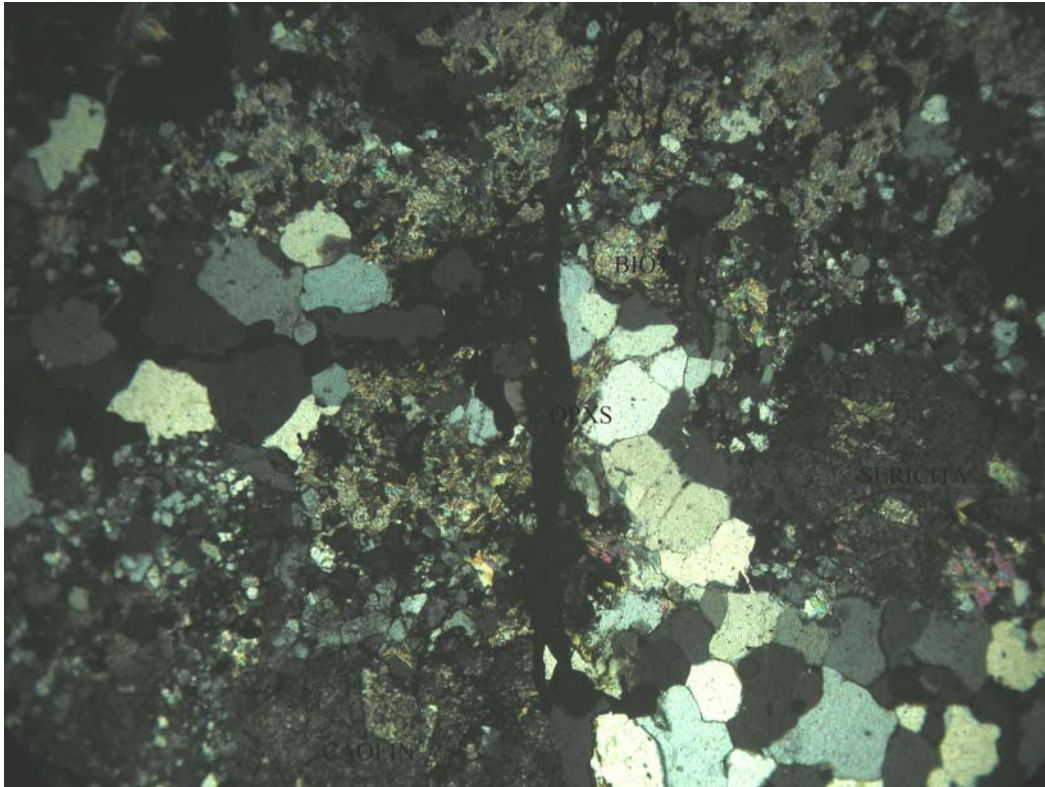
**Foto 5:** En el lado izquierdo roca porfirítica de Dos Amigos con cristal de plagioclasa remplazado por epidota, sericita reemplazada por arcillas. El lado derecho roca volcánica de la Formación Bandurrias con clorita reemplazado biotita en una matriz con alteración cuarzo-sericita reemplazada por arcillas.

## V.2 ALTERACIÓN FILICA

Afecta rocas de los centros porfiríticos Dos Amigos y Tricolor, Brecha Marisol y rocas volcánicas del Grupo Bandurrias. Forma un halo irregular de 5 km x 1,5km y se ubica entre la zona potásica que afecta a los centros porfiríticos y la zona con alteración propilítica (Fig. 28). Se caracteriza por la asociación cuarzo-sericita-pirita, su desarrollo es pervasivo y produjo la destrucción general de minerales de otras asociaciones de alteración como la alteración potásica y propilítica (Foto 5 y 6).

La profusión de agregados microcristalinos de cuarzo-sericita destruye la textura de la roca y la convierte microscópicamente en una masa blanca. La textura del pórfido solo se reconoce por la preservación de los ojos de cuarzo (Foto 5).

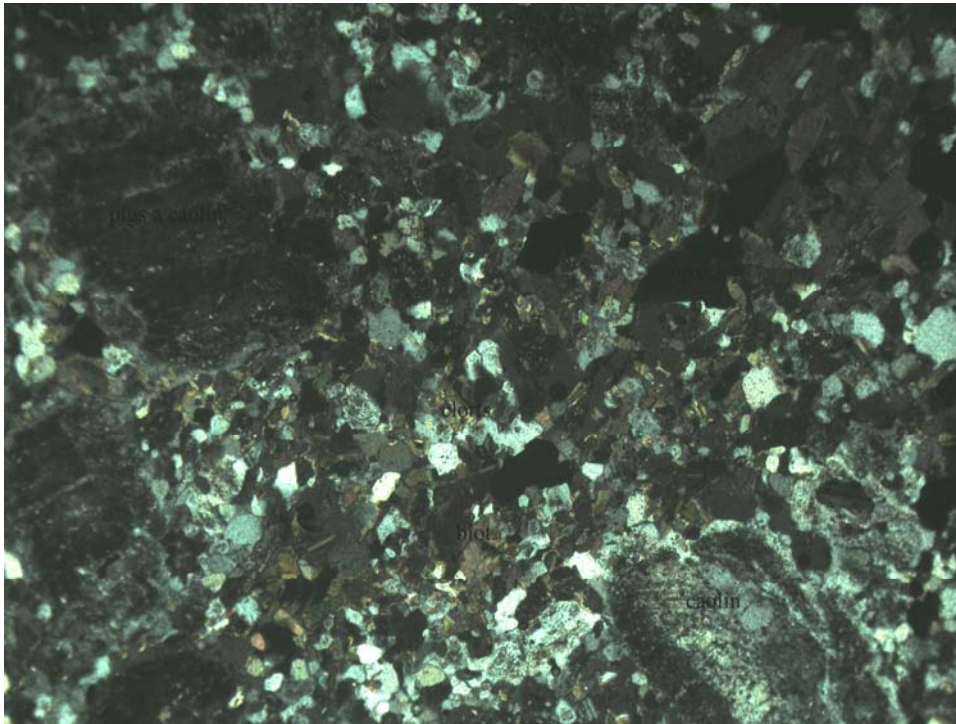
Análisis con difracción de rayos X permitieron identificar andalucita (T° de formación alrededor de 400°C, (Anexo III) y caolinita asociadas con la alteración cuarzo-sericítica.



**Foto 6.** Pórfido Dos Amigos con alteración cuarzo-sericita, vetillas de cuarzo tipo B atravesada por vetilla de pirita. Biotitas y plagioclasas sericitizadas en matriz fina de cuarzo-sericita.

### V.3 ALTERACIÓN ARGÍLICA AVANZADA

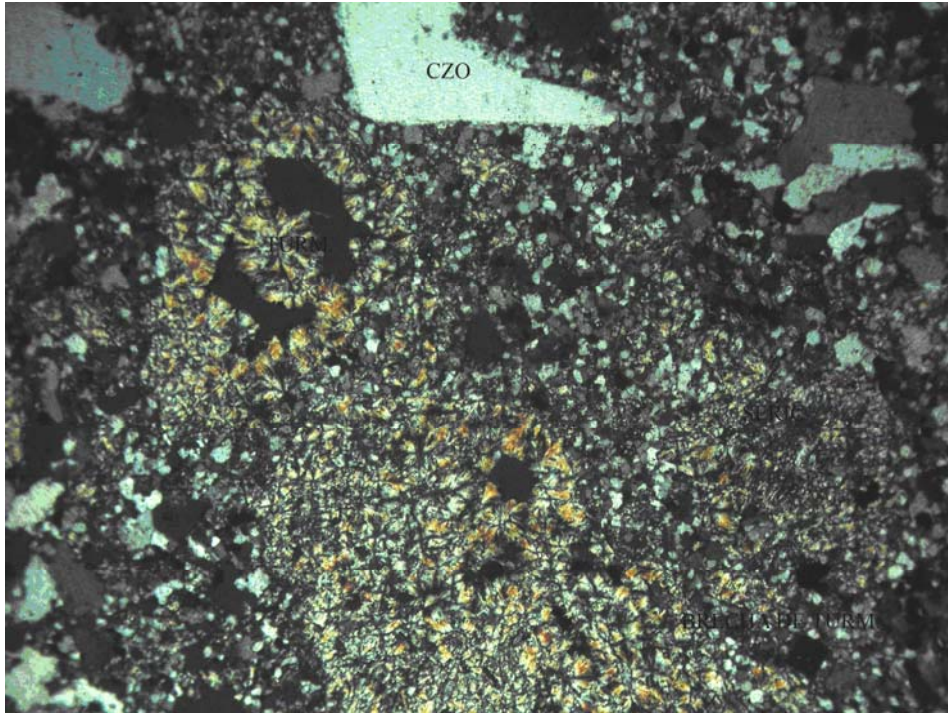
Afecta rocas volcánicas de la formación Bandurrias, rocas porfíricas Dos amigos y Tricolor; y en mayor grado a la Brecha Marisol (esta zona aflora en niveles topográficos más altos, Fig. 29). La distribución de esta alteración es irregular y está controlada por el sistema de Fallas Dos Amigos, ha sido caracterizada por 7 muestras que fueron analizadas por difracción de rayos X (la ubicación geográfica se da en la Tabla 1, resultados en el Apéndice III). La asociación mineralógica que caracteriza esta alteración pervasiva es pirofilita-sericita-cuarzo-arcillas (Foto 5, 6 y 7; Fig. 28). La presencia de cuarzo oqueroso tipo “vuggy” (Figura 28) y sulfuros como enargita en vetillas tipo D coinciden con su presencia.



**Foto No 7 (30X).** Alteración cuarzo-sericita-caolín. Plagioclasas sericitizadas y argilizadas en roca volcánica de la formación Bandurrias.

### **Brecha Hidrotermal Marisol.**

En la parte central del área de estudio se ubica el sector denominado Brecha Marisol (Fig. 2, 8, 26 y 27). Corresponde a una brecha hidrotermal polimíctica, que se presenta como un cuerpo cilíndrico irregular y concéntrico de 500 x 600 m con elongación mayor E-W. El núcleo interno está formado por brecha hidrotermal con clastos angulosos a subangulosos de rocas volcánicas alteradas y algunos de pórfido en una matriz de cuarzo-sericita-turmalina y polvo de roca (Fotos 8 y 9). La turmalina está en vetillas y en forma diseminada como rosetas (Foto 8). El halo concéntrico externo se caracteriza por presentar fragmentos redondeados a subangulosos de rocas volcánicas andesíticas principalmente en una matriz fina de polvo de roca algo silicificada con cristales de piritita (Foto 9). En esta brecha hidrotermal existen labores mineras que permiten observarla 150 m debajo de la superficie, donde se presentan fragmentos de pórfido en mayor proporción que en superficie. En general la matriz representa entre el 30 a 40% de los constituyentes de la brecha.



**Foto 8:** Se observa brecha turmalina en rosetas en roca con alteración cuarzo-sericita-caolín.



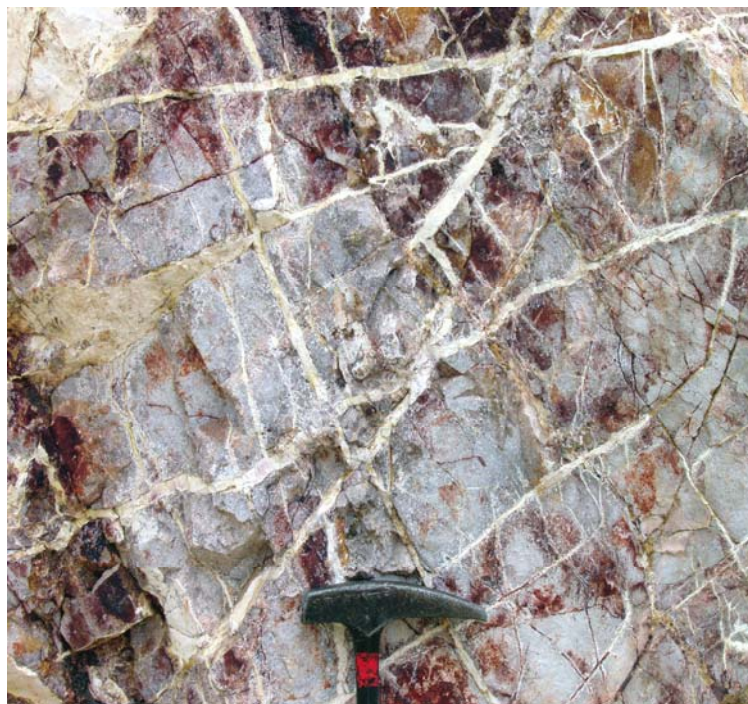
**Foto No 9.** Brecha de turmalina con fragmentos volcánicos angulosos (cm hasta 1m de diámetro, con alteración cuarzo-sericita).

La alteración argílica avanzada se limita a las partes altas del sistema, en profundidad cambia gradacionalmente a cuarzo-sericita-pirita-turmalina. Existe mineralización de pirita-enargita en vetillas y diseminada asociada a la alteración argílica avanzada. Hacia profundidad cambia a calcopirita-enargita-pirita con algunos tenores de bornita en fragmentos con vetillas tipo B.

#### V.4 ALTERACIÓN SUPERGENA

##### ALTERACIÓN ARGILICA

Esta alteración afecta principalmente rocas volcánicas del Grupo Bandurrias al noreste del núcleo Dos Amigos, aflora en forma elongada con dirección norte-sur. Los análisis de rayos X (Apéndice III) permiten definirla como una zona de illita-caolinita-alunita (yeso). Se asocia a la zona lixiviada en cúmulos y rellenos de fracturas sobre zonas con alteración propilítica y fílica (Foto 10), presenta localmente biotita gruesa primaria con sobreimposición de arcillas principalmente.



**Foto 10:** se observa fracturas rellenas con alunita en roca lixiviada.

## V.5 VETILLAS ASOCIADAS.

Las vetillas son estructuras tridimensionales generalmente planares (fracturas) que se encuentran selladas por asociaciones de minerales, las cajas pueden ser rectas o sinuosas. Los bordes de las vetillas pueden ser regulares o irregulares (influencia de penetración de los minerales hacia la roca caja).

Las vetillas en la Zona Hidrotermal de Domeyko que están asociadas. Se describen, teniendo en cuenta las relaciones de corte que define su relación espacial y temporal.

Las vetillas tipo M, son de forma irregular y discontinuas están rellenas por biotita-magnetita y tienen anchos de 0,02 mm hasta 2mm, no presentan estructura interna y carecen de halos de alteración, la atraviesan todas las vetillas, se interpretan como vetillas tempranas y que se formaron por reemplazo o metasomatismo de la roca caja, estas vetillas normalmente son difíciles de distinguirlas por su alto contenido de biotita (Foto 11). En la zona de estudio se limitan a la zona con alteración potásica.

Vetillas Tipo A, son de forma irregular y discontinuas a veces algo onduladas, contienen principalmente cuarzo con menor biotita, los anchos irregulares miden de 0,2 mm a unos 6 mm, tiene contenidos de pirita, calcopirita, bornita y magnetita, contenido de sulfuros totales con respecto a la vetilla es de 1-2% del volumen total. Atraviesan a las vetillas tipo M y no presentan halos de alteración. Se asocian a la alteración potásica (Foto 11 y 12).

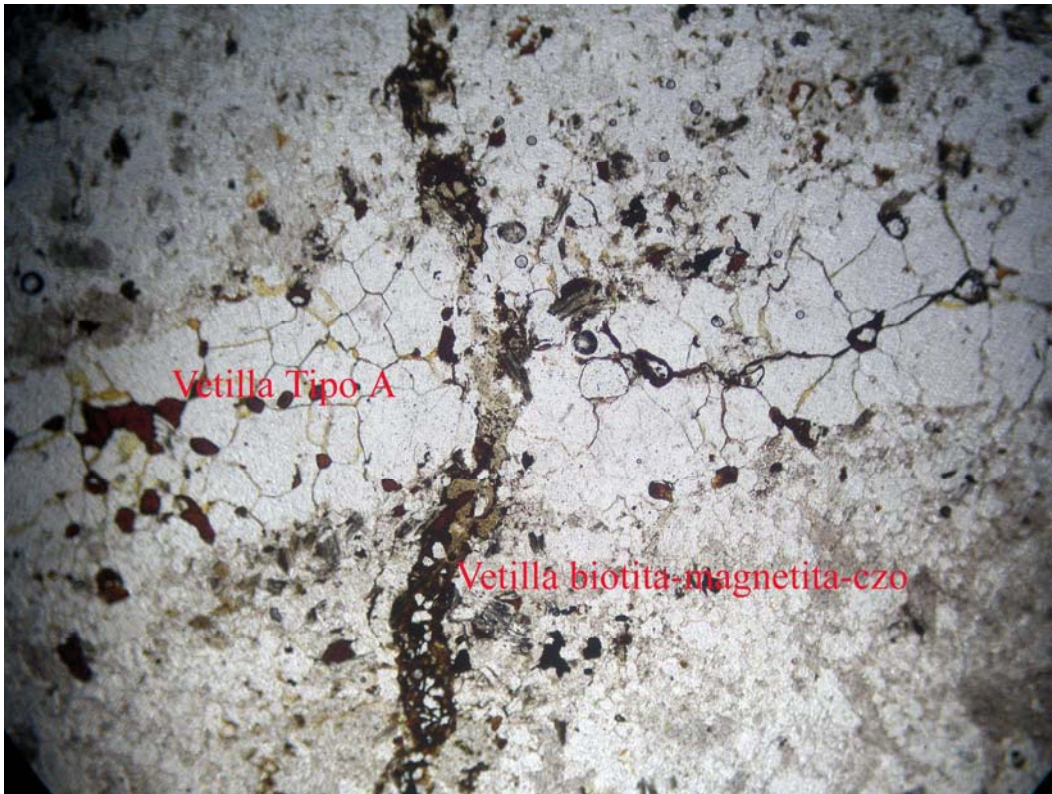
Vetillas tipo B, son continuas y rectas a veces onduladas están rellenas por cuarzo anhedral y euhedral, algunas vetillas presentan bandas paralelas de pirita, calcopirita, magnetita y bornita con biotita. Estas vetillas cuando presentan sutura al centro y están rellenas con pirita-calcopirita y bornita ocasionalmente, se asocian a una textura destruida reemplazada por cristales finos de sericita, que aparentan halos de alteración en la vetilla, los sulfuros están en el rango de 2-5% del volumen total con respecto al relleno de la vetilla. Atraviesan vetillas tipo M y tipo A (Foto 11 y 12). Estas vetillas en los cristales anhedrales y euhedrales presentan inclusiones fluidas. Se asocia a la alteración potásica con superposición de alteración cuarzo sericita.



Vetillas D son de forma plana y continua principalmente son de pirita y cuarzo muscovita en menor proporción, se observa intercrecimiento de pirita, calcopirita con cuarzo, presentan halos de alteración formada por sericita, se asocia a la alteración cuarzo-sericita. Atraviesa vetillas tipo M, A y B (Foto 6 y 7). La presencia de cuarzo en cristales euhedrales y anhedrales con inclusiones fluidas. Se asocia a la alteración cuarzo-sericita y propilítica.

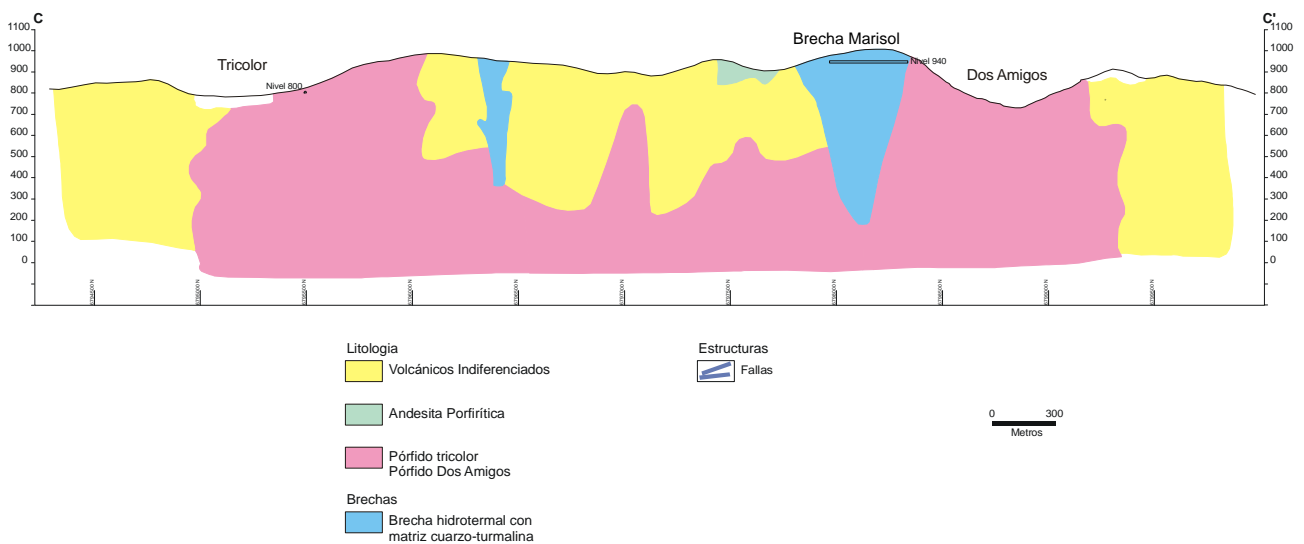


**Foto 11.** Vetillas Tipo M, A y B en una matriz de biotita-magnetita. Las vetillas Tipo M (oscuras) son atravesadas por las vetillas tipo A (onduladas), la vetilla tipo A es atravesada por la vetilla Tipo B (continua con sutura al centro).



**Foto 12.** Se observa vetilla Tipo A atravesada por vetilla Tipo B, en roca con alteración potásica.

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**ZONA DE ALTERACION DE DOMEYKO**  
 SECCION GEOLOGICA C-C'  
 Viendo al este



**Figura 29.** Sección geológica longitudinal NS, se muestra ubicación de Brecha Marisol en partes altas de la zona de estudio (en celeste).

## CONTEXTO GENERAL

La descripción de estas asociaciones mineralógicas de alteración y vetillas asociadas. Permiten interpretar distintos eventos de alteración que se desarrollaron en y alrededor de la Zona de Alteración de Domeyko y caracterizan temporalmente cuatro eventos de alteración Hidrotermal (Foto 13, Figura 28, 29).

1) La alteración potásica (biotita-magnetita  $\pm$  feldespato potásico) y la alteración propilítica (clorita-epidota-actinolita-calcita) son dos tipos de alteración sincrónicos tempranos asociados a la cristalización de cuerpos ígneos de pórfidos, se asocian vetillas tipo M y vetillas de cuarzo Tipo A.

2) La alteración fílica (cuarzo-sericita-pirita) es una segunda etapa con alteración hidrotermal-hipógena que obliteró total y/o parcialmente los dos tipos de alteración del primer evento. Se asocian las vetillas de cuarzo Tipo B y D

3) La alteración argílica avanzada (pirofilita-sericita-cuarzo-arcillas) es un tercer evento hidrotermal sobrepuesto a los anteriores, afecta principalmente las cotas altas en el sistema. Se asocian con vetillas de cuarzo y pirita tipo D

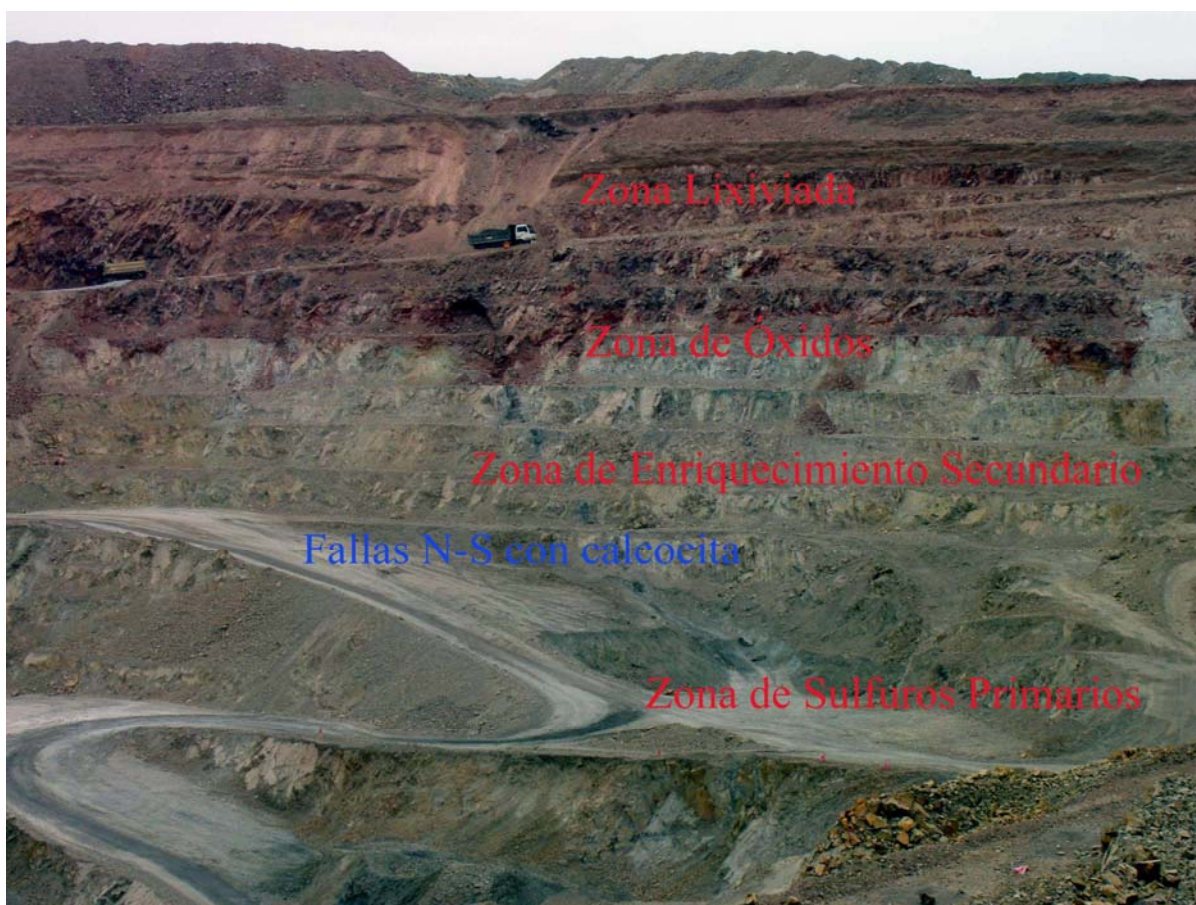
4) La alteración argílica (illita-caolinita-alunita (yeso)), es un cuarto evento de carácter supérgeno que se desarrolló en condiciones ácidas como consecuencia de la descomposición de abundante pirita por aguas meteóricas percolantes.



**Foto 13.** Se observa dos tipos de alteración en el rajo Dos Amigos.

## VI. MINERALIZACIÓN

La Zona de Alteración de Domeyko, presenta mineralización de cobre con oro subordinado que se relaciona, principalmente, a los núcleos de alteración potásica Dos Amigos, Tricolor y a la Brecha Marisol. La mineralización de cobre ocurre en sulfuros hipógenos, sulfuros supérgenos y minerales oxidados de cobre. En un perfil vertical desde superficie al fondo del rajo abierto de Dos Amigos se distingue 4 zonas (Foto 14): (1) Zona lixiviada, (2) zona de óxidos (3) zona de enriquecimiento supérgeno y (4) zona de minerales primarios.



**Foto 14.** Se observa la zonación vertical de mineralización supérgena y sulfuros hipógenos desde la zona más profunda en el rajo Dos Amigos hasta la superficie. Zona de sulfuros primarios (calcopirita-bornita), zona de enriquecimiento secundario (calcosina, calcopirita, pirita). Falla con calcosina-pirita.

## VI.1 ZONA DE SULFUROS HIPOGENOS

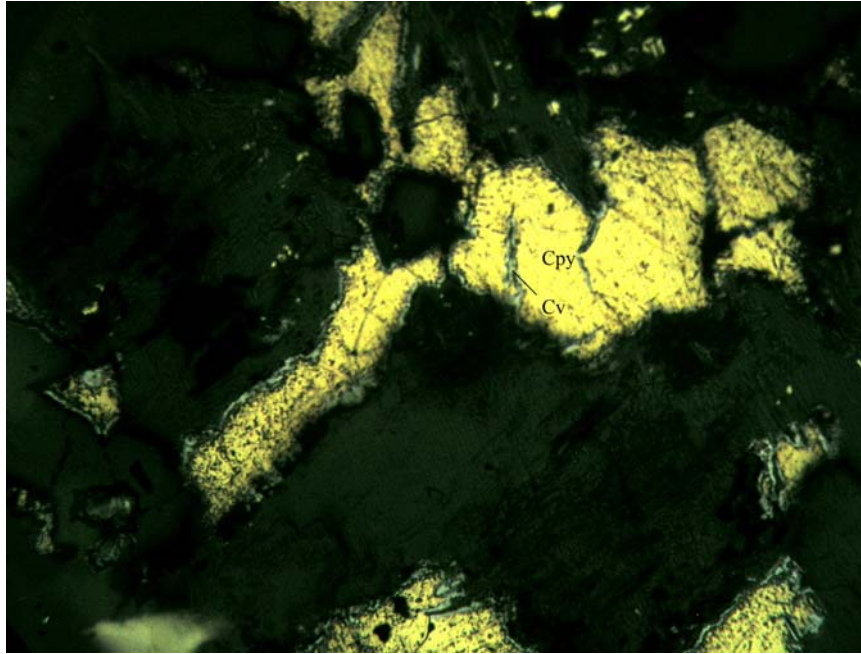
La mineralización hipógena o zona de minerales primarios se asocia a un stockwork de vetillas y diseminación en la roca. Se definen como ensambles de intercrecimiento, diseminado y en vetillas de cuarzo tipo A, B y D. La diseminación esta en el orden de 3% a 10% como sulfuros totales en volumen con respecto a la roca. La presencia de mineralización primaria (Foto 14) esta presente solo en las partes más profundas del rajo Dos Amigos (Zona Potásica). En una asociación mixta con sulfuros secundarios se asocia a partes marginales (zona fílica, propilítica y argílica avanzada).

Los minerales mejor preservados que mantienen su textura se describen a continuación, de acuerdo a sus texturas clasificaremos los ensambles característicos.

Magnetita, se presenta como agregado de cristales anhedrales de 0,1 a 3mm de longitud, comúnmente se le observa con biotita en vetillas tipo A y en intercrecimiento con calcopirita y pirita en vetillas tipo B. El contenido de sulfuros totales es de 1 a 2% (Foto 15 y 16).

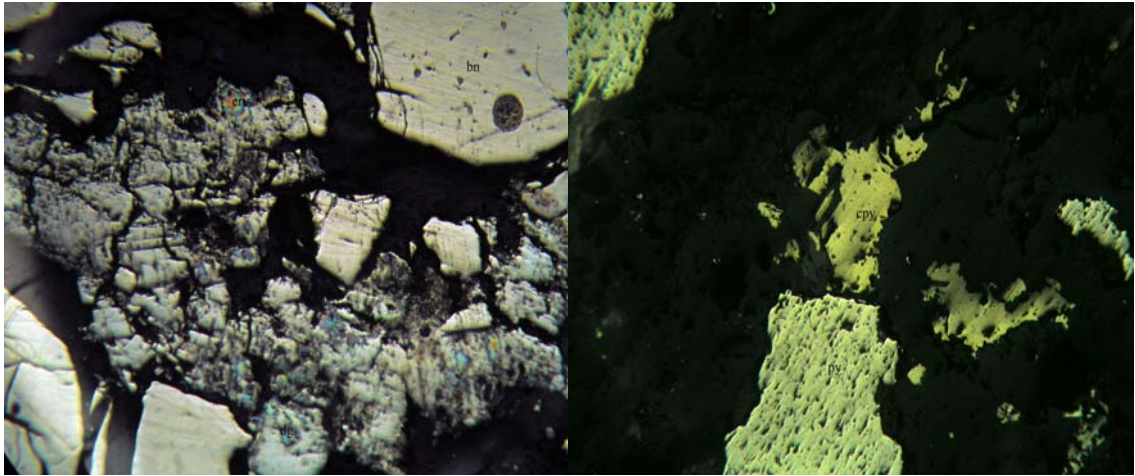
Calcopirita, se presenta en granos anhedrales y subhedrales con tamaños en el rango de 2 a 1,6mm, se presenta como inclusiones en cristales de pirita (Foto 17), se le observa en texturas de intercrecimiento con cristales de magnetita y bornita principalmente en vetillas tipo B (Foto 15 y 16). El contenido de sulfuros totales es hasta 1% ocasionalmente.

Bornita, se presenta como agregados cristalinos anhedrales y subhedrales de 0,2 a 2 mm, se le observa en textura de intercrecimiento con calcopirita y magnetita en vetillas tipo B (Foto 16). Su ocurrencia es relativamente escasa, los contenidos con respecto a los sulfuros totales no pasa de 0,5%.

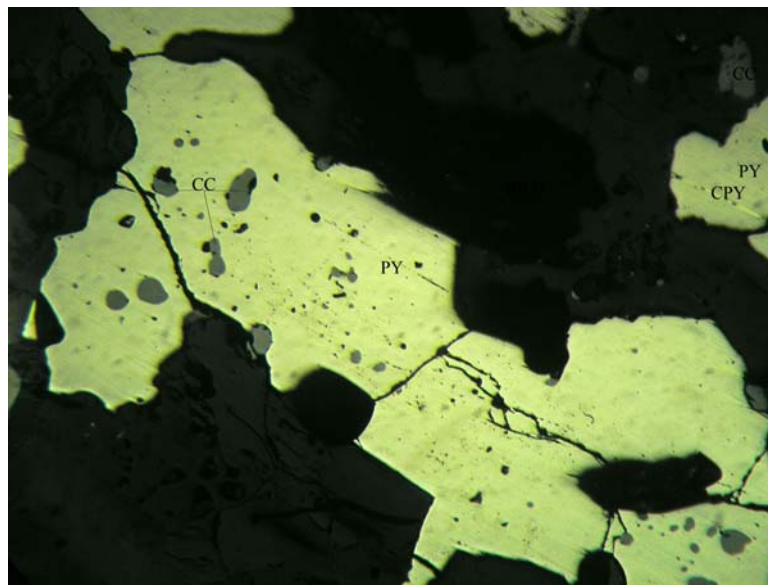


**Foto 15,** Se muestra cristales de calcopirita intercrecida con magnetita en una vetilla tipo B, calcopirita (Cpy) con reemplazo parcial de covelina (Cv) en los bordes. Se observa texturas de exolución entre magnetita-calcopirita.

Pirita, se presenta como agregados cristalinos anhedrales y subhedrales de 0,2 hasta 5mm, se observa en mayor proporción en las vetillas tipo D, en la mayoría de los casos esta reemplazada por calcocina, se le observa en texturas de intercrecimiento con magnetita-calcopirita en menor proporción; la asociación pirita, calcopirita es más común y se asocia a las vetillas tipo D, solo una vez durante el estudio de secciones pulidas se pudo observar su asociación con enargita, el contenido total de sulfuros totales representa el rango de 1 hasta 10%. El contenido de pirita se incrementa notablemente cuando se asocia a la alteración cuarzo-sericita (Foto 17).



**Foto 16.** Se muestra bornita (bn), magnetita, pirita con texturas de intercrecimiento, en una vetilla tipo A, indica que estos minerales son contemporáneos. Se observa en el lado izquierdo calcopirita reemplazada por calcosina, covelina y crisocola.



**Foto 17.** Se observa intercrecimiento de pirita (PY) con magnetita (mgta), calcopirita (CPY) magnetita en exsolución con pirita (PY) lado derecho superior. Se observa reemplazamiento de pirita por calcosina (CC).

## VI.2 ZONA DE SULFUROS SUPERGENOS

El horizonte con sulfuros secundarios se ubica entre las cotas 740 m a 820 m (Foto 14). El límite superior esta en contacto con la cubierta oxidada subhorizontal. Mientras que el

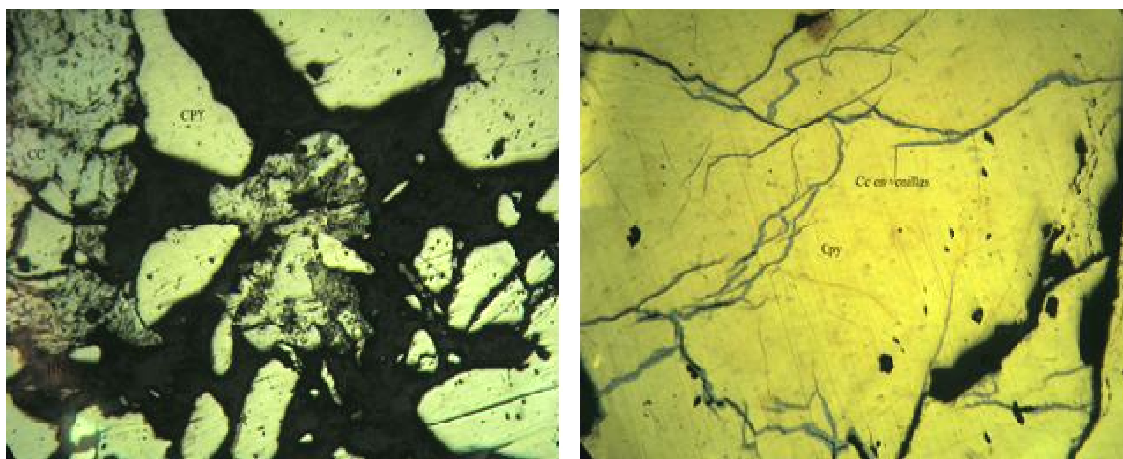
límite inferior es irregular y tiene diferentes anchos y ha sido controlado por fallas. La potencia promedio de la zona con sulfuros secundarios es de unos 30 m, pero en zonas fracturadas de falla puede alcanzar hasta 60 m (Foto 14).

Los sulfuros secundarios ocurren reemplazando parcialmente minerales de mena primarios a partir de fracturas, contactos y/o bordes entre cristales.

La calcosina se presenta en forma pulverulenta y en grano fino reemplazando, calcopirita y en mayor grado pirita, se observa reemplazo a partir de fracturas y bordes entre cristales (Foto 16, 17 y 18). Su distribución es la más abundante con respecto a otros minerales supérgenos, el contenido con respecto a los sulfuros totales es de 1 a 3%.

La covelina y la digenita representan contenidos menores con respecto a la calcosina, reemplazan cristales de pirita, calcopirita y bornita (foto15, 16 y 18). La covelina y digenita solo se presentan de la parte media del nivel de enriquecimiento con incremento de covelina hacia el fondo del nivel u horizonte de sulfuros secundarios.

El análisis químico de 8 muestras indica, leyes de cobre en esta zona que alcanza valores de hasta 1,25 % de Cu (Apéndice III).



**Foto 18.** Se observa a la izquierda mineralización primaria del primer evento calcopirita-bornita reemplazada parcialmente por calcosina. En el lado derecho calcopirita con calcosina secundaria a lo largo de microfracturas.



### VI.3 ZONA DE LIXIVIACIÓN

Es producto de la meteorización del depósito con los consecuentes cambios geoquímicos ligados a la descomposición de minerales sulfurados hipógenos. Aflora, cubriendo casi toda el área de estudio, algunas veces como es el caso del pórfido Tricolor está cubierta por gravas aluviales recientes. Presenta una potencia promedio de 100 m. Incluye principalmente goethita con mayor distribución que hematina, ambos reemplazan pirita (Foto 19) a lo largo de la zona de alteración filica, principalmente en los pórfidos Dos Amigos, Tricolor y Brecha Marisol. En la cubierta lixiviada se formaron minerales supérgenos como alunita y yeso rellenando fracturas (Foto 10 y 19) y sombreros de Hierro (Foto 20).

Los resultados de 10 muestras con análisis geoquímicos indican en esta zona contenidos de 86 ppm hasta 831 ppm Cu (Tabla 3).

En el halo de alteración sílice-sericita-alunita dos muestras indican anomalías de Au de 0.20 g/t hasta 0.26 g/t Au.

Las brechas hidrotermales con matriz de cuarzo-turmalina indican valores de cobre de 36 a 1.267 ppm Cu, mientras, el Au reporta valores de 0.01 a 0.04 g/t Au.



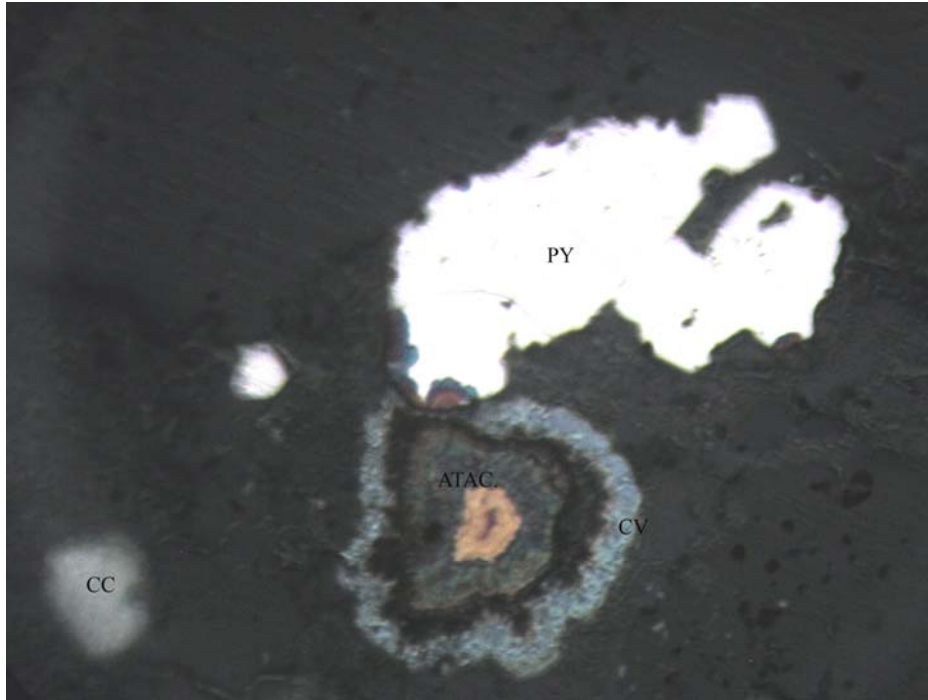
**Foto 19.** Se observa hematita reemplazando pirita.



**Foto 20.** Se observa el sombrero de hierro (gossan) en Dos Amigos con profusa hematita.

#### V.4 ZONA DE ÓXIDOS

La zona de óxidos se encuentra irregularmente entre la zona lixiviada y zona de enriquecimiento secundario (Foto 14 y 21, Figura 27). Resultados de difracción de rayos X indican que esta zona esta caracterizada por atacamita-crisocola (Foto 21) y en menor grado brochantita, con goethitas y amarantita, la potencia es irregular desde unos pocos metros hasta 30 m en zonas de falla. Resultados de análisis químico indican valores de 1%Cu a más (Anexo I, Tabla III).



**Foto 21.** Se observa Atacamita (Atac) secundaria rodeando pirita (Py), calcocina (cc) secundaria en la parte izquierda inferior.

## CONTEXTO GENERAL

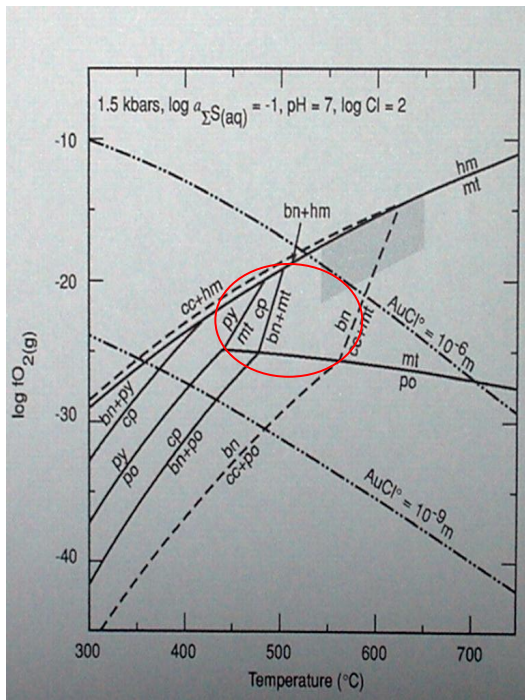
De acuerdo a la información, relaciones de corte, texturas de reemplazo, se definen tres eventos de mineralización que se asocia a eventos de alteración hidrotermal descritos en el capítulo anterior.

El evento 1. Presenta la asociación magnetita-calcopirita-bornita-pirita que representa temperaturas de 400 a 600°C en el ambiente del feldespato potásico estable (Fig. 30 y 31) y está asociada con la alteración potásica (magnetita-biotita secundaria). Es común observar vetillas de cuarzo tipo A, B y vetillas tipo M (biotita-magnetita) con mineralización de calcopirita-bornita-pirita, contemporáneo con el evento 1 se produce un evento 2, que tiene una asociación de calcopirita con mayores contenidos de pirita asociada a biotita secundaria cloritizada y alteración pervasiva cuarzo-sericita, en este evento, las vetillas tipo D incrementan su presencia y los contenidos de sulfuros totales incrementan hasta 6 % de volumen en roca (Fig. 31)

El evento 3 tardío está asociado a la alteración argílica avanzada incluye una gran variedad de sulfuros en el depósito. Incluye la asociación calcopirita, bornita, enargita, galena y pirita (Fig 31). Esta asociación tardía forma nuevas vetillas, reabre vetillas antiguas y los contenidos de pirita aumentan considerablemente hasta 10% en volumen de roca.

El Pórfido Dos Amigos muestra una zona de enriquecimiento inmaduro y de reducida dimensión, ya que se caracteriza por cristales de pirita, calcopirita y bornita hipógenos parcialmente reemplazados por los sulfuros supérgenos (Fig 31). Se infiere que los fluidos ácidos percolantes generados por la lixiviación de la abundante pirita de los niveles altos fueron rápidamente neutralizados en la zona potásica bajo el nivel de aguas subterráneas y como consecuencia el transporte de cobre en las soluciones en este ambiente neutro a alcalino fue limitado, de modo que se formó un horizonte de unos pocos metros de espesor (30m en la zona de estudio). Finalmente un evento supergeno presenta la ocurrencia de óxidos, sulfatos y silicatos verdes de cobre como brocantita, atacamita y crisocola (Fig 31).

La sobreimposición de eventos hidrotermales reflejan los contenidos de cobre. El análisis de muestras en la zona potásica hipógena evento temprano, la ley de cobre no sobrepasa a 0,3%, aunque, una muestra reportó hasta 0.8 g/t Au. En áreas con alteración fílica las leyes de cobre son hasta 0,4% Cu y hasta 0.34 g/t Au. Sin embargo, las leyes del mineral con calcosina que se trata en la planta de Dos Amigos están en el orden de 1,25 % Cu, es decir el proceso de enriquecimiento supérgeno triplicó y hasta cuadruplicó las leyes hipógenas de cobre. Las leyes de sulfuros en el evento tardío son menores a 0,3% Cu, estarían asociadas a zonas de lixiviación. Dentro de la zona con alteración propilítica la pirita es el sulfuro más común con ocurrencias locales de calcopirita diseminada. Las leyes de cobre están abajo de 0,1% Cu en peso.



**Figura 30.** Sistema Fe-Cu-S-O. Equilibrio del ensamble magnetita-bornita-calcopirita en el campo de la estabilidad del feldespato (Witney et al 1985) se da a temperaturas de 400° a 600 °C.

RESUMEN	ALTERACION	POTÁSICA	FÍLICA	ARGÍLICA AVANZADA	PROPILÍTICA	
<b>ROCA</b>	PÓRFIDO VOLCÁNICAS	.....	.....	.....	.....	
<b>VE TILLAS</b>	TIPO M TIPO A TIPO B TIPO D	..... .....	.....	.....	.....	

MINERALIZACIÓN	ALTERACION	PARAGENESIS				
		POTÁSICA	FÍLICA	ARGÍLICA AVANZADA	PROPILÍTICA	SUPERGENA
<b>GANGA</b>	BIOTITA	.....				
	FELD-K	.....				
	CUARZO	.....			.....	
	SERICITA	.....				
	CLORITA	.....			.....	
	CAOLÍN	.....			.....	
	ARCILLAS	.....				.....
	PIROFILITA	.....			.....	
	ANDALUCITA	.....			.....	
	ALUNITA	.....			.....	.....
	YESO	.....				.....
	EPIDOTA	.....			.....	
CALCITA	.....			.....		
<b>HIPÓGENA</b>	MAGNETITA	.....				
	BORNITA	.....				
	CALCOPIRITA	.....		.....	.....	
	PIRITA	.....			.....	
	ENARGITA	.....			.....	
	GALENA	.....			.....	
ORO	.....					
<b>OXIDOS-Fe</b>	HEMATITA					.....
	GOETHITA					.....
	JAROSITA					.....
<b>ÓXIDOS-Cu</b>	BROCHANTITA					.....
	ATACAMITA					.....
	CRISOCOLA					.....
<b>SECUNDARIA</b>	CALCOCITA					.....
	COVELITA					.....
	DIGENITA					.....

**Figura 31.** Se muestra secuencia paragenética para la zona de Alteración DeDomeyko.

## VII. MICROTHERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

### VII.1 FUNDAMENTOS

El estudio de inclusiones fluidas es importante en los yacimientos metalíferos, ya que proveen información directa de la composición química de los fluidos hidrotermales que originaron la mineralización metálica. Además, con las características físicas y químicas de las inclusiones fluidas se puede inferir los niveles de formación en un sistema hidrotermal. El objetivo del estudio preliminar de inclusiones fluidas en el presente trabajo, es determinar la distribución temporal y espacial de los diferentes tipos de inclusiones que se asocian a los principales tipos de alteración en el sistema hidrotermal.

Durante el proceso de crecimiento de un cristal a partir de un fluido hidrotermal, puede atrapar gases o líquidos en imperfecciones de la estructura cristalina, las que forman cavidades y quedan selladas a medida que el cristal sigue creciendo. Las inclusiones fluidas ocupan cavidades microscópicas que quedan dentro de minerales depositados a partir de una solución hidrotermal. Estas inclusiones pueden ser de una fase (líquido; siempre presente), dos fases (líquido-vapor) y tres fases (líquido-vapor-sólido). Se denominan (1) inclusiones **fluidas primarias** si el atrapamiento ocurre durante el crecimiento del cristal y representan una pequeña muestra de la solución hidrotermal original, (2) **inclusiones fluidas secundarias**, cuando el atrapamiento ocurre por recristalización y sellado posterior de una superficie de fractura y representan condiciones postdeposicionales del mineral huésped (3) **inclusiones fluidas Pseudosecundarias**, se forman durante el crecimiento del cristal en microfracturas o planos de crecimiento del cristal.

### VII.2 METODOLOGIA

Las mediciones microtermométricas se realizaron en una platina calentadora-congeladora, marca LINKHAM THM-600 (-160°C/500°C) con un sistema de control LINKHAM TMS-90, montada sobre un microscopio óptico LEITZ (ortolux).

Se determinó:

Los tipos de inclusiones fluidas presentes en minerales hidrotermales del yacimiento y los respectivos tamaños de las burbujas de vapor.

La temperatura de homogenización (temperatura mínima de entrapamiento del fluido hidrotermal).

La temperatura de fusión del hielo para determinar la salinidad mediante la fórmula dada por Potter et al (1978).

$$\% \text{ peso NaCl eq.} = 1,76958T_f - 0,042384 T_f^2 + 0,00052778 \times T_f^3 \pm 0,028$$

$T_f$  = temperatura en °C a la que se funde el último cristal de hielo en la inclusión.

La fórmula permite calcular la salinidad en el rango -20,8°C a 0°C de temperaturas de fusión.

Las mediciones de inclusiones fluidas se hicieron con 5 muestras del sistema Dos Amigos. Las muestras son de vetillas de cuarzo tipo B (DAN-11, DAE-05, TS-4) pertenecen al centro potásico y cuarzo tipo D (DAN-2 y DAN-11) son de la zona con alteración fílica.

En el análisis de inclusiones fluidas se han podido definir 2 tipos de inclusiones primarias. Existen otras de color negro, ricas en vapor difíciles de determinar sus temperaturas de homogenización y fusión. Se observa muchas inclusiones fluidas asociadas a fracturas, en su mayoría son de carácter secundario.

Durante las mediciones hubo temperaturas de homogenización que sobrepasan los 500°C, que sobrepasan el límite de medida superior en la platina térmica utilizada. Estos valores se consideran solo como mayores a 500°C.

## CLASIFICACIÓN DE INCLUSIONES FLUIDAS

Muchos autores exponen diferentes criterios, para clasificar las inclusiones fluidas, unos por su tamaño, morfología, otros por el grado de llenado, que es el porcentaje ocupado por la fase líquida respecto al volumen total de la inclusión, para este trabajo

consideramos la clasificación hecha por Nash (1976), se basa en fases observables a temperatura ambiente (Fig 32):

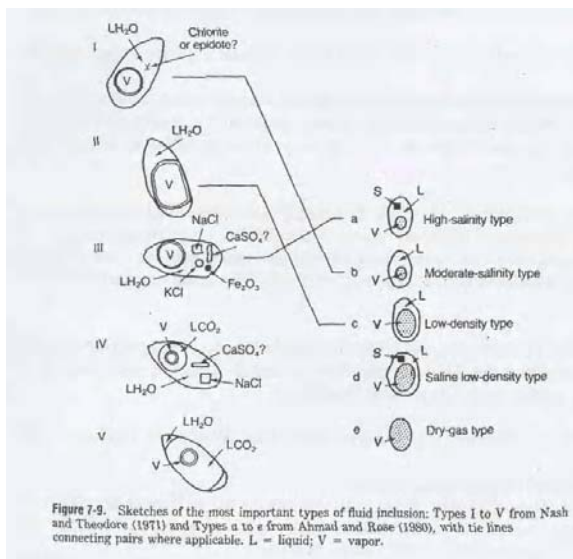
**Tipo I** Líquidas con una pequeña burbuja de vapor, sin minerales hijos: originados por un fluido subsaturado, rico en agua (líquido), menor 26% en peso de NaCl eq; se homogenizan a líquido al calentarlas.

**Tipo II** Líquidas con una gran burbuja de vapor, sin minerales hijos: fluido original rico en vapor; al calentarlas la burbuja se expande y se homogenizan a vapor.

**Tipo III** Polifases (líquido+vapor+sólidos), contienen uno o más minerales hijos: fluido saturado con mayor a 26% de NaCl eq., contiene fases sólidas halita silvita a temperatura ambiente. Existen dos subtipos (a) fluido subsaturado al atrapamiento; al calentarlas desaparece primero la sal y luego la burbuja y (b) fluido saturado al atrapamiento: al calentarlas desaparece primero la burbuja y luego la sal.

**Tipo IV** Dos líquidos y minerales hijos, son inclusiones con CO<sub>2</sub>; típicamente presentan doble burbuja, porque incluyen líquido rico en H<sub>2</sub>O y líquido rico en CO<sub>2</sub> y vapor+ CO<sub>2</sub> gaseoso, además de fases sólidas.

**Tipo V** CO<sub>2</sub> líquido con vapor, sin minerales hijos: contienen agua líquida, CO<sub>2</sub> líquido y una burbuja pequeña de vapor. Corresponden a un fluido subsaturado en sales y rico en CO<sub>2</sub>.

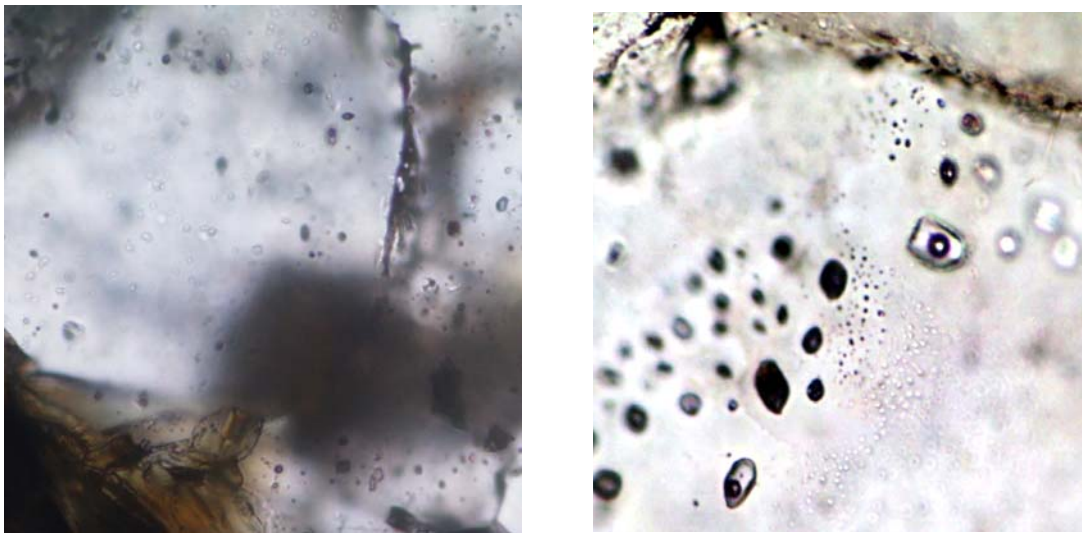


**Figura 32.** Se observa la clasificación de inclusiones fluidas. Según Nash y Theodore (1971).

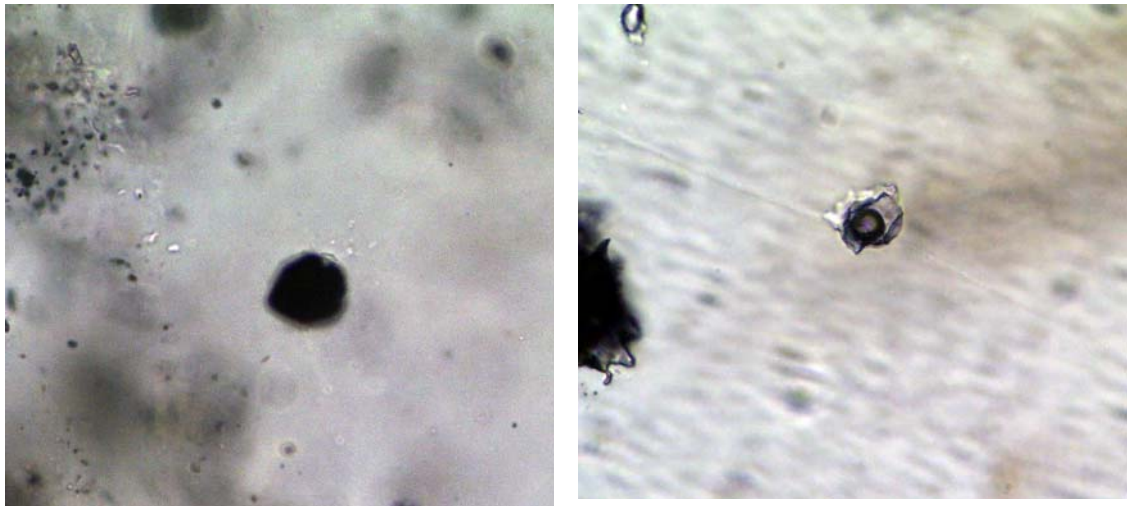


### VII.3 RESULTADOS

Los dos tipos de inclusiones fluidas que se han medido en Dos Amigos, se refieren a cristales de euhedrales y anhedrales de cuarzo asociados a vetillas de cuarzo tipo B y D. Las inclusiones fluidas tipo I que se asocian principalmente a las vetillas de cuarzo Tipo B (Foto 22, Figura 32), ellas contienen fluidos con salinidades menores a 26% en peso de NaCl eq. y en muchas ocasiones tienen fases opacas (minerales hijos). Algunas veces se asocian espacialmente a inclusiones tipo II que contienen bajas salinidades. Las inclusiones tipo II (Foto 23, Figura 32) están principalmente en vetillas de cuarzo cristalizado tipo D que contienen fluidos con bajas salinidades y ocasionalmente con altas salinidades (Anexo III).



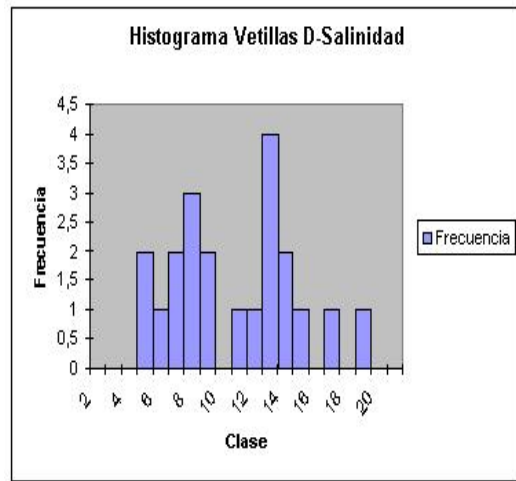
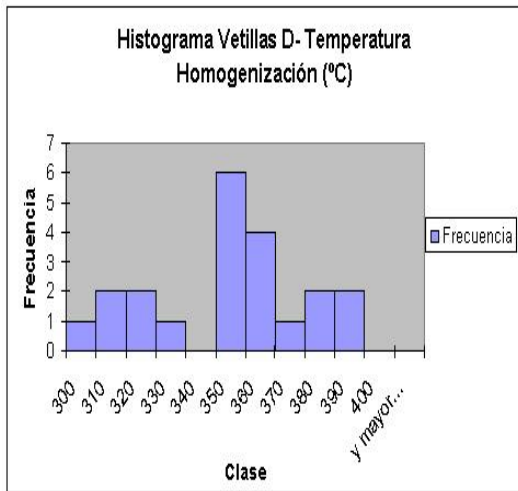
**Foto 22.** Inclusiones fluidas tipo I, con una fase opaca (magnetita?), Tamaño hasta 10  $\mu\text{m}$ .



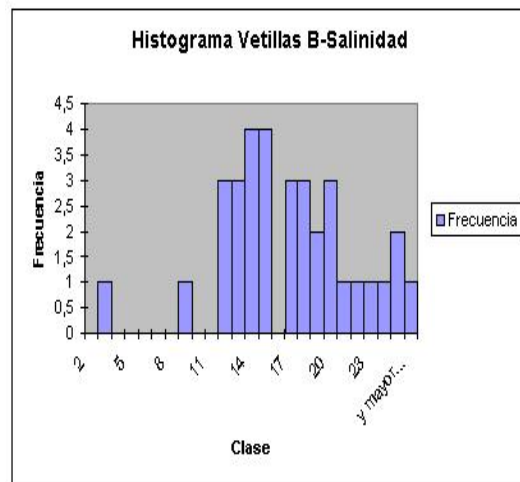
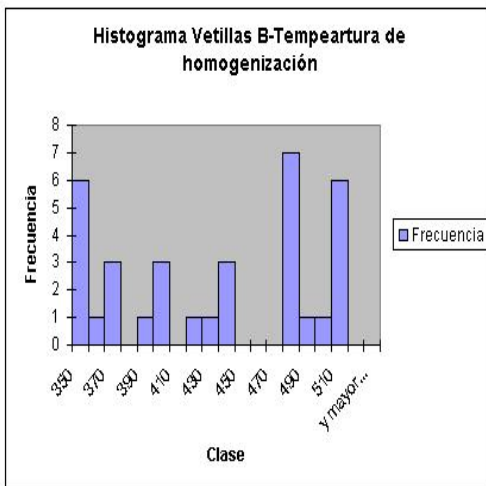
**Foto 23.** Inclusiones fluidas tipo II, gran burbuja de vapor, algunas veces bifásica tamaño mayor a 10  $\mu\text{m}$ .

Los datos de  $T^{\circ}$  de homogenización y salinidad para vetillas tipo B Y D (Tabla 3 y Anexo III) se muestran en los histogramas de las Figura 33 y 34; en la Figura 35 muestra gráfico de temperatura de homogenización versus salinidad.

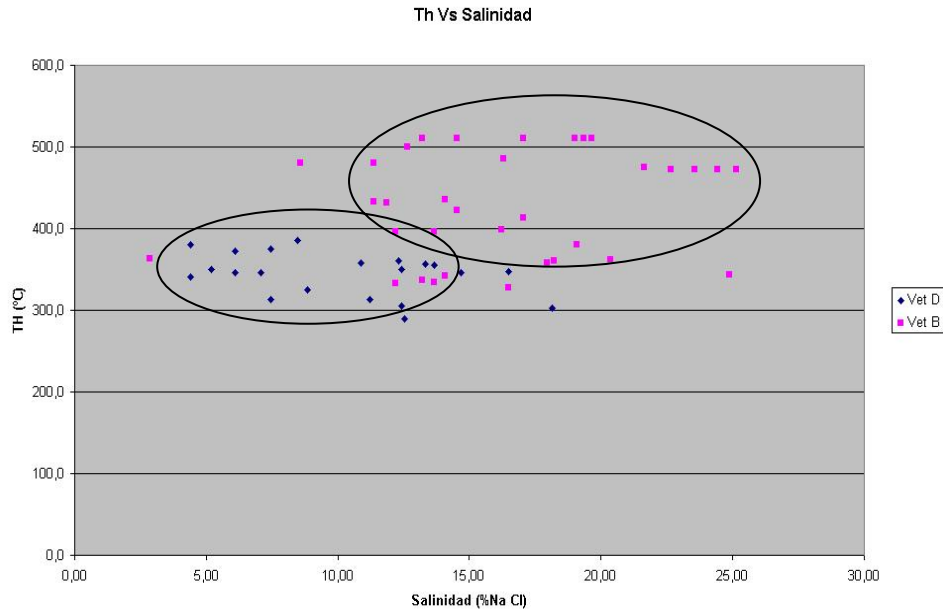
En estos diagramas se observan que la temperatura de homogenización para las vetillas tipo D (Figura 33) tienen rangos de 300 a más de 400°C con un pico alto en 350°C y salinidades de NaCl eq. entre 6 a 20% con picos altos en 8 y 14%. Para las vetillas B (Figura 31) muestra temperatura de homogenización de 350 a mas de 500°C y salinidad de NaCl eq. de población irregular, entre 3% y mas de 26% con picos altos en 15%, 19%, 21% y 25%. Sin embargo en la Figura 35 que muestra el gráfico temperatura de homogenización versus salinidad de NaCl eq., muestra dos poblaciones definidas, una población que tiene salinidades entre 5 a 10 % de NaCl eq. y temperaturas de homogenización bajo de 400°C corresponde a medidas realizadas en vetillas de cuarzo tipo D. La segunda población define salinidades altas de 12 a 26% de NaCl eq. y altas temperaturas de homogenización corresponden a las vetillas de cuarzo tipo B.



**Figura 33** : Se muestran histogramas en Vetillas D. Lado izquierdo muestra T de homogenización en el eje X, valor alto en 305°C. Lado derecho histograma que muestra salinidad en el eje X , valores altos de salinidad en 8 y 14% NaCl eq.



**Figura 34** : Se muestran histogramas en vetillas B. Lado Izquierdo de temperatura de homogenización en el eje X, el histograma es irregular, valores altos en 490° y mayores a 500°C. Lado derecho histograma de Salinidad, muestra valores en 15 % y 19% NaCl equivalente.



**Figura 35:** Gráfico Temperatura de homogenización versus salinidad equivalente para inclusiones fluidas de Pórfido Dos Amigos en vetillas de cuarzo tipo B y D. La dispersión de datos es grande. Se observa dos poblaciones definidas para salinidades entre 5 a 10 % de NaCl equivalente y temperaturas de homogenización bajo de 400°C corresponde a medidas realizadas en vetillas de cuarzo tipo D (azules). El otro conjunto de salinidades altas de 12 a 26% de NaCl equivalente y altas temperaturas de homogenización corresponden a las vetillas de cuarzo tipo B (rosado).

## CONTEXTO GENERAL.

Se observaron dos tipos de inclusiones fluidas tipo I con tamaño de burbuja de 5 % hasta 10% de vapor con respecto al total de la inclusión y de tipo II con burbuja de tamaño de 10% hasta 25%. Estos tipos de inclusiones fluidas no definen ninguna característica en especial (Fotos 22 y 23 y Tabla No 3).

Las pocas inclusiones fluidas que se pudieron medir en cristales de cuarzo euhedral y anhedral dentro de vetillas de cuarzo tipo B y tipo D se asocian principalmente a la zona potásica y fílica respectivamente. Presentan patrones bien definidos y separados. Las inclusiones fluidas que representan las vetillas de cuarzo tipo D presentan rangos de salinidad de 5% a 15% NaCl y temperaturas de homogenización entre 280°-350°C, mientras que, las inclusiones que representan a las vetillas de cuarzo tipo B presentan

rangos de salinidad más amplio de 10% hasta 28% y temperaturas de homogenización de 350° a más de 500°C.

## **VIII. DISCUSIÓN DEL MODELO PARA LA ZONA ALTERADA DE DOMEYKO.**

### **AMBIENTE TECTONICO**

Las rocas volcánicas (andesitas, dacitas) intrusivas porfiríticas (tonalitas, granodioritas) y rocas intrusivas (dioritas granodioritas), en la Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko-Dos Amigos, son de filiación calcoalcalina y fueron emplazadas en un margen continental activo con subducción de corteza oceánica bajo el mismo, que incluyó una etapa inicial caracterizada por un sistema de arco magmático y una cuenca de trasarco con sedimentación marina durante el Jurásico y Cretácico Inferior. Específicamente, la posición paleogeográfica de Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko es la parte oriental del arco del Cretácico Inferior (lavas andesíticas Neocominas, porfidos Albianos y granodiorita cenomaniana).

Los stock porfiríticos de la Zona Alterada de Domeyko, tienen composición de tonalitas a granodioritas consistente con el rango composicional de dioritas, cuarzo dioritas y tonalitas con características calco-alcálico de otros pórfidos de Cu-Au a nivel mundial. Aunque, también existen pórfidos de Cu-Au asociados con rocas shoshoníticas y alcalinas (Sillitoe, 2000). Es el caso, para el pórfido Andacollo, le asignan filiación shoshonítica (Levi et al. 1988; Kaiser, 1942; Reyes, 1991). Asimismo, los pórfidos aflorantes en la zona de estudio son afines a los depósitos porfiríticos de cobre-oro, Tipo I de la serie magnetita (Ishihara, 1981) y que según (Cox y Singer, 1988), están principalmente asociados a stocks emplazados en niveles someros de la corteza (1-2 Km). La abundancia de magnetita hidrotermal en estos depósitos a nivel mundial al igual que la zona de Alteración de Domeyko, sugieren que los magmas que originaron a los intrusivos huésped fueron oxidados (alta fugacidad de oxígeno) (Sillitoe, 1979);

Los depósitos porfiríticos de Cu-Au al igual que la Zona Alterada de Domeyko, se generan en límites de placas convergentes con litosfera oceánica subductada. En Chile, Perú y Filipinas, se ubican en arcos volcanoplutónicos relacionados a subducción, de los

cuales, algunos se generan durante intervalos cuando el arco esta sujeto a períodos de extensión débil como en Cerro Corona y Minas Conga en el norte de Perú (Petford y Atherton, 1994), Marte, Lobo, Refugio y Cerro Casale en el cinturón Maricunga, norte de Chile (Kay et al., 1994). También, el progreso de la extensión produce un rift de intrarco como la cuenca Cagayan (Florendo, 1994) que hospeda el depósito Dinkindi en Luzon, Filipinas. Contrariamente, la mayoría de los autores coinciden que, los pórfidos cupríferos, se emplazaron típicamente en un ambiente compresión regional (Sillitoe, 1998), esta compresión puede ser producto de subducción de una cordillera sísmica, como es el caso de Lepanto Far Sureste (Yang et al., 1996) o colisión de arco-continente como en Grasberg y Ok Tedy (Dewey y Bird, 1970). En la Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko, el desarrollo del sistema porfírico coincide con la ocurrencia de cizalle sinistral de la Falla Dos Amigos, el cuál podría relacionarse a los primeros empujes compresivos que produjeron la inversión tectónica de la cuenca de trasarco en el Cretácico Superior.

## **GEOCROLOGIA**

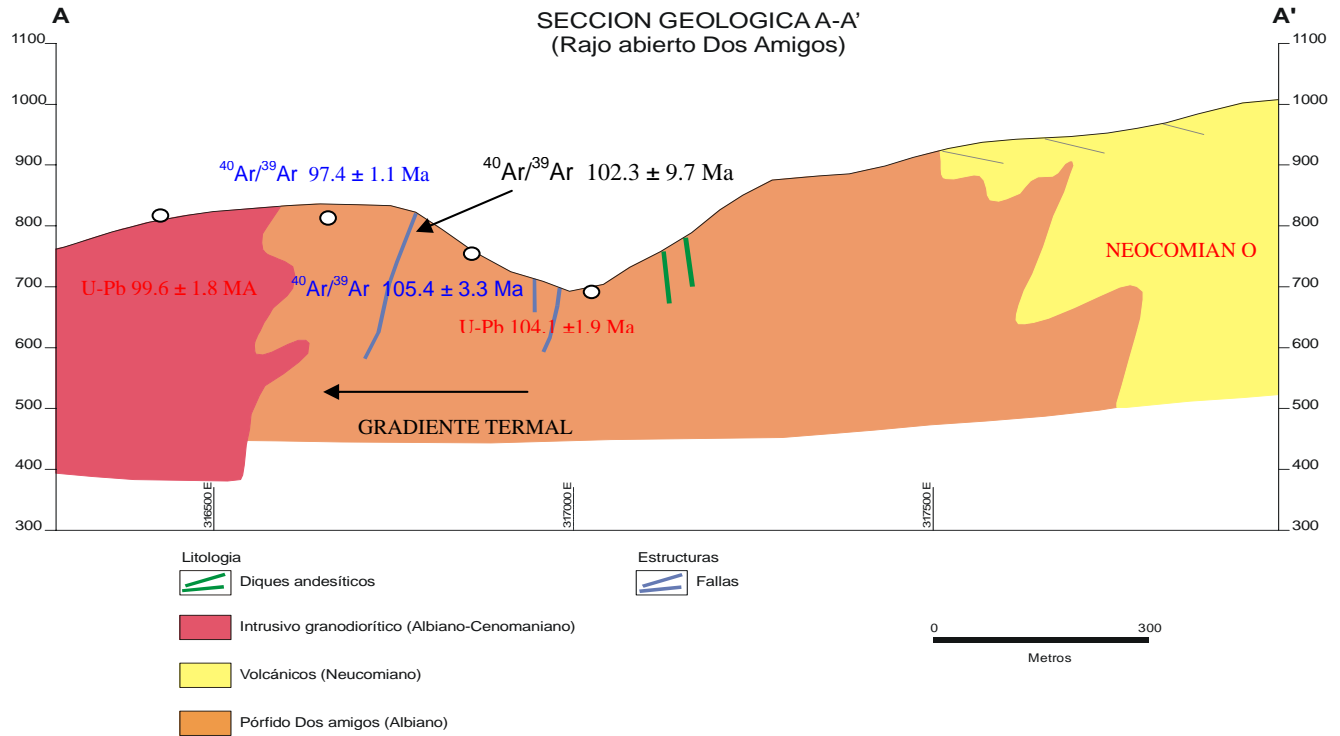
La Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko, incluye el emplazamiento de los pórfidos Dos Amigos y Tricolor en el **Albiano** con el desarrollo de alteración hidrotermal y fallamiento asociado a los mismos (primer evento). La cristalización y enfriamiento del Batolito adyacente que intruye, por el oeste a la zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko ocurrió en el **Cenomaniano**, produciendo un rejuvenecimiento (resetting) total o parcial de las micas de los depósitos (segundo evento, (Fig. 36). Finalmente La Brecha Marisol, parece sugerir un tercer evento termal del **Coniaciano**.

A nivel mundial, los depósitos porfiríticos con contenidos ricos y/o pobres en oro, son predominantemente de edad Terciaria (Mioceno a recientes). Generalmente los pórfidos más jóvenes en los arcos de Isla del Pacifico Oeste comparados con los de la Cordillera de los Andes reflejan un rápido destechamiento y eventual erosión en regiones tropicales relativos a ambientes áridos (Sillitoe, 1997). Sin embargo hay ejemplos de depósitos porfiríticos Mesozoicos preservados en British Columbia, Canadá (Christopher and Carter, 1976), hay también depósitos Paleozoicos al este de Australia (Perkins et al., 1995) y Asia Central (Zvezdov et al., 1993). Muchos de estos depósitos antiguos

parecen ocurrir en arcos de islas, terrenos acrecionados a márgenes continentales (Sillitoe, 2000). En comparación con pórfidos de la franja Cretácica de Chile, tenemos el pórfido Andacollo, dos muestras tomadas por Reyes (1991) en el centro porfírico Andacollo resultan con el método K-Ar una edad de 104 Ma y que concuerda con los fechamientos publicados por Berg and Breitkreuz(1983). Por lo que, el pórfido Andacollo con la Zona Alterada de Domeyko sugieren que ellos se emplazaron durante el desarrollo de un arco volcánico-plutónico del Cretácico Inferior (Albiano)

En Domeyko existe el complejo de Brechas Marisol. A nivel mundial, las brechas hidrotermales están comúnmente pero no todas, asociadas con los depósitos porfíricos de cobre ricos en oro, pueden ser de eventos tempranos donde se asocian las brechas magmático-hidrotermales o eventos tardíos de brechas freatomagmáticas en eventos finales de la evolución de pórfidos. Las brechas magmático-hidrotermales son, volumétricamente restringidas, clastosoportadas, monolitológicas o polimícticas con alteración potásica y mineralización de cobre y oro. De hecho en algunos lugares los contenidos de cobre y oro se duplican cuando la mineralización esta en stockwork y diseminada. Ejemplo las brechas de Panguna (Clark, 1990) Endeavour 27 en Goonumbla (Heithersay et al., 1990) y Mount Polley (Fraser et al., 1995). Las brechas magmático-hidrotermales tardías contienen menos cobre y oro y pueden tener ley subeconómica. La brecha de diatrema es generalmente de baja ley o estéril como la brecha Braden de El Teniente (Maksaev, 2004) con algunas excepciones (Ej. Galore Creek; Enns et al., 1995). En el caso específico de la Zona Alterada de Domeyko, el complejo de brechas Marisol, parece ser un evento tardío y desafortunadamente con poco contenido de Cu-Au, pero con abundante pirita.

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**ZONA DE ALTERACION DE DOMEYKO**



**Figura 36:** sección geológica transversal, mostrando geología con respectivas dataciones y el gradiente termal relacionado al intrusivo.

## ESTRUCTURAS

Algunos pórfidos cupríferos, a nivel mundial, se ubican en zonas de falla principales, mientras muchos otros tienen estructuras cercanas relativamente pequeñas. Este caso es ejemplificado para los depósitos porfíricos del Eoceno-Oligoceno de Chile asociados al sistema de Falla Domeyko (Boric et al., 1980; Mpodozis et al 1994). En otras latitudes, los yacimientos Far Southeast, Guinaoagan, Santo Tomas II y Kingking, todos ellos se ubican en un sistema de fallas transcurrentes de 1.500 Km. de longitud en Filipinas (Sillitoe y Gappe, 1984). Algunos otros depósitos porfíricos se infiere que están asociados a lineamientos con profundidad penetrativa en la corteza, ejemplo Goonumbla y Cadia Hill en el lineamiento River Lachlan en New South Wales, Australia (Walshe et al., 1995). En resumen no hay un ambiente estructural específico favorable para la ubicación de los depósitos porfíricos de cobre ricos en oro. Pero las estructuras mayores son las más favorables para el emplazamiento de porfidos, este es el caso, para la Zona



Alterada de Domeyko que estaría asociada a una estructura Mayor como es el Sistema de Falla Atacama.

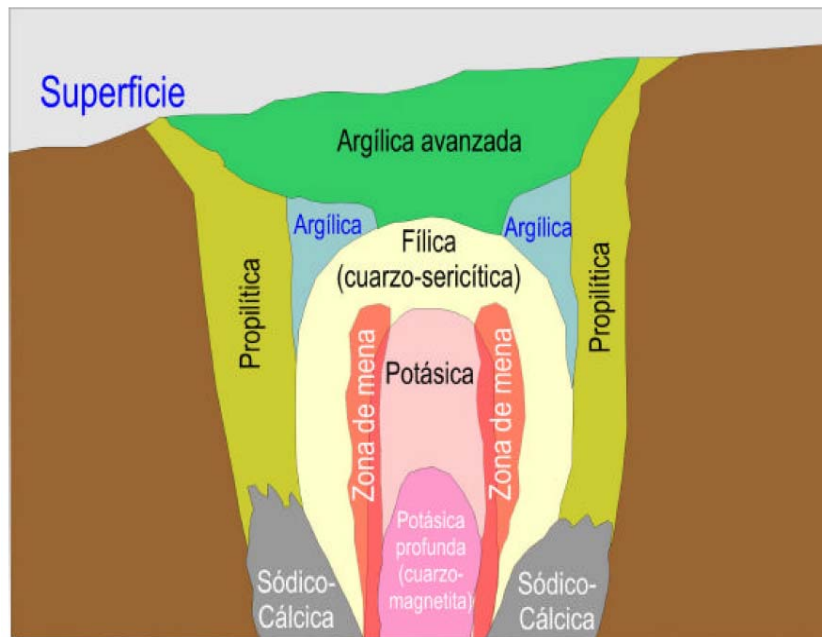
En la Zona Hidrotermal de Domeyko. La Falla Dos Amigos de movimiento sinistral, estuvo activa desde tiempos Neocomianos (premineral) hasta los 96 Ma (Intra-post mineralización) por lo menos. Este hecho corrobora, la datación de biotita del pórfido Tricolor milonitizado, que sugiere que el cizalle sinistral estaba activo cuando se emplazó el pórfido. La Falla Dos Amigos, puede corresponder a una estructura subsidiaria del Sistema de Falla Atacama localizada más al este. Contrariamente, en el pórfido Andacollo, según Reyes (1991), existen dos sistemas de fallas; un sistema premineral de fallas normales que permitieron desarrollar espacios abiertos para la circulación de fluidos mineralizantes y emplazamiento de vetas y mantos; y otra posmineral que consiste en una serie de fallas extensionales. Maksaev et. al. (2006), también sustenta que Tricolor, Dos Amigos y Andacollo están en zonas de cizalle sinistral y se habrían formado durante un periodo de transpresión.

## **ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN.**

La distribución y evolución temporal de los tipos de alteración y mineralización presentes, en la Zona de Alteración Hidrotermal de Domeyko, son típicas de los sistemas porfíricos de cobre, que se desarrollan en rocas silicatadas en y rodeando los depósitos porfíricos (Fig 34). Es decir, la alteración silicato de Ca-Na, potásica, propilítica, argílica intermedia, sericitica (fílica) y argílica avanzada (Meyer y Hemley, 1967). La variedad de sulfuros presentes en estos depósitos son parte integral de estas asociaciones de minerales de alteración, los sulfuros con contenidos de cobre con oro asociado (molibdenita asociada) pueden constituir la mena.

La Zona de Alteración de Domeyko, caracteriza temporalmente cuatro eventos de alteración Hidrotermal (potásica (biotita), fílica, argílica avanzada y supergena) y hasta tres eventos de mineralización asociada (magnetita-calcopirita-bornita, calcopirita-pirita-bornita, pirita-calcopirita) (Fig. 37). En comparación con otros depósitos de la franja Cretácica, la alteración hidrotermal dominante es potásica, definida por la asociación de biotita-feldespatos K, con predominio de biotita. En Antucoya, se han identificado con esta alteración, vetillas de cuarzo con magnetita-sulfuros de cobre y en Galenosa-Puntillas

hay presencia de vetillas de cuarzo tipo A. Lateralmente, esta fase grada a propilitización con clorita epidota y calcita. La alteración fílica existe, pero su extensión es muy restringida, lo que sugiere que ha sido erosionada ( Camus, 2003).



**Figura 37.** Distribución de zonas de alteración hidrotermal en un pórfido cuprífero combinando los modelos de Lowell y Gilbert (1970 ), Gustafson y Hunt (1975). Núcleo de alteración potásica rodeado de alteración fílica (cuarzo-sericítica), alteración argílica intermedia local en torno a zona fílica, halo externo de alteración propilitica, alteración sódico-cálcica profunda (Carten,1986; Dilles & Einaudi, 1992) y cubierta de alteración argílica avanzada (De Makshev, 2003).

En Andacollo se reconoce un núcleo central con alteración potásica (Biotita-feldespato K), fílica y alteración propilitica en las periferias. El núcleo central con alteración potásica tiene mineralización hipógena de pirita y calcopirita en proporción de 1:4, hematita especular y menores cantidades de magnetita y molibdenita. Dentro de este núcleo, existe oro asociado al pórfido de cobre y, lateralmente, al oeste y noroeste del depósito, el oro se encuentra en vetas y mantos (Reyes, 1991).

Los pórfidos de Cu-Au en la franja del Eoceno Superior–Oligoceno en Chile, presentan cuadros de evolución de alteración y mineralización, donde dominan la alteración potásica y, en menor grado, la alteración fílica. La alteración potásica consiste de biotita, feldespato-K, anhidrita y vetillas tipo A. La magnetita siempre está presente, llegando hasta 6% en volumen en el yacimiento La Fortuna (Perelló et al.,1996), lo que es

característico de un alto estado de oxidación para los magmas asociados, los que varían de composición desde diorita a diorita cuarcífera. Un aspecto relevante es la presencia de litocapas con alteración argílica avanzada en la Fortuna, Cerro Coya y Exploradora. En La Fortuna, las fases de alteración tempranas del sistema porfírico, han sido sobrepuestas, dentro de su evolución, por un evento de mineralización de alta sulfuración que acompaña a la alteración argílica avanzada, lo cual habría ocurrido entre 35-32 Ma (Perelló et al., 1996).

En la franja del Oligoceno-Mioceno Medio (Franja Maricunga), se tiene pórfidos de oro con menores contenidos de Cu, los mejores representantes de esta franja son los yacimientos Marte, Refugio y Cerro Casale. Geológicamente, estos depósitos son pórfidos de oro encajados, generalmente, en centros volcánicos erosionados, durante dos períodos de tiempo, 25-20Ma y 14-12Ma (Fig 4) (Vila y Sillitoe, 1991; Mpodozis et al., 1995). Los complejos intrusivos asociados son de composición; predominantemente; microdiorítica a diorita cuarcífera. Los cuadros de zonación de alteración y mineralización, asociados a estos complejos, están dominados por alteración potásica, con biotita, feldespato- K y anhidrita, a la cual se sobrepone alteración argílica intermedia (sericita-arcilla-clorita). Hacia los márgenes existe propilitización, con clorita, epidota, calcita y abundante pirita. La mineralización aurífera se asocia a la alteración potásica y se relaciona con enrejados de vetillas de cuarzo de múltiples generaciones (Vila y Sillitoe, 1991; Muntean y Einaudi, 2000). Existe abundante magnetita y hematita especular vinculada tanto a la etapa tardimagmática como a la alteración argílica intermedia, aunque la magnetita, asociada a esta última, es un remanente de la fase potásica (Muntean y Einaudi, 2000). Una característica importante de estos sistemas, son las litocapas con alteración argílica avanzada, a las que se asocia mineralización epitermal de metales preciosos de alta sulfuración (Muntean y Einaudi, 2001). El ejemplo más espectacular de esta relación es Cerro Casale (Vila y Sillitoe, 1991). Muchas de estas características descritas son comunes a los dos centros porfíricos presentes en la Zona Alterada de Domeyko.

## EFECTOS SUPERGENOS

El Pórfido Dos Amigos muestra una zona de enriquecimiento inmaduro (Fig 38) y de reducida dimensión (30m de espesor aproximadamente), se caracteriza por cristales de pirita, calcopirita y bornita hipógenos parcialmente reemplazados por los sulfuros supergenos de calcosina principalmente. Se infiere que los fluidos ácidos percolantes generados por la lixiviación de la abundante pirita de los niveles altos fueron rápidamente neutralizados en la zona potásica bajo el nivel de aguas subterráneas y como consecuencia el transporte de cobre en las soluciones en este ambiente neutro a alcalino fue limitado, de modo que se formó un horizonte de unos pocos metros de espesor, pero con una ley de cobre que frecuentemente supera el 1% Cu.

El enriquecimiento de la Zona Alterada de Domeyko coincide con otros depósitos de tipo pórfido cuprífero ricos en oro, aunque estos, en general carecen de zonas de relevancia económica con sulfuros supergenos de cobre. Ello debido a que tienen bajos contenidos de pirita y alta capacidad de neutralización de las soluciones supergenas en sus zonas con alteración potásica con contenidos de cobre y oro. Consecuentemente las cubiertas lixiviadas son principalmente goethíticas y algunas contienen apreciables contenidos de malaquita, crisocola, neotocita, pitch limonita (goethita cuprífera) y minerales oxidados de cobre (cf Anderson, 1982). Sin embargo hay notables excepciones que han desarrollado zona enriquecidas con calcosina como Bingham (Boutwell, 1905), Tanamá (Cox 1985), Ok Tedi (Bamford, 1972), Sungai Mak, Almalyk (Shayakubov et al., 1999), Majdanpek (Herrington et al., 1998) y Andacollo (Reyes 1991). Las cubiertas lixiviadas se han desarrollado en zonas con alteración argílica intermedia ricas en pirita y contienen más jarosita que goethita. (e.g., Marte; Vila et al., 1991). De hecho esta característica es común en Dos Amigos, ya que expone un sombrero de fierro con goethita. El Pórfido Andacollo presenta un horizonte con enriquecimiento secundario de 30m de potencia y ocupa un área de 1.5 km<sup>2</sup>, la mineralización consiste en patinas de calcosina rodeando y/o reemplazando parcialmente pirita y calcopirita.

La evolución geomorfológica del área y de la región es muy importante para el desarrollo y preservación de la zona de enriquecimiento secundario. En la III Región extensos depósitos aluviales de las gravas de Atacama corresponden a piedemontes del Mioceno-Plioceno relacionados a una superficie de erosión-sedimentación a la que posiblemente

se relacionan el desarrollo de los procesos supérgenos que afectaron el mejor desarrollo en los pórfidos cupríferos de la franja cretácica. Los procesos supérgenos que afectaron a las franjas metalógenicas de la parte Norte (II Región) y Central de Chile han sido documentadas por Alpers y Brimhall (1988); Boric et al (1990); Sillitoe y McKee (1996) y Makshev y Zentilli (1999), Según estos autores, estos se iniciaron en el Oligoceno Inferior (35 Ma) y persistieron hasta el Mioceno Medio (14 Ma) (Sillitoe 2005). Durante este período de 21 Ma, las franjas de pórfidos comprendidas entre el Cretácico hasta el Mioceno Medio, fueron afectadas por moderados a intensos procesos de oxidación y enriquecimiento supérgeno. La edad del proceso, basada en dataciones K-Ar en alunita supérgena, que coexiste dentro del recubrimiento lixiviado hematítico de Galenosa-Puntillas, es de  $21,1 \pm 0,6$  Ma (Sillitoe y Mackee, 1996). Esta edad se estima mínima, en consideración a que los procesos supérgenos ya habrían comenzado a partir de los 35 Ma en la franja Paleocena y probablemente afectaron también a la franja del Cretácico (Sillitoe y Mckee; 1996).

Los yacimientos porfiríticos Cretácicos, ubicados en la III región de esta faja, están casi exclusivamente en la zona de alteración potásica con escasa piritita como es el caso de la Zona de Andacollo (Marquardt, 1980). Contrariamente, Dos amigos, presenta mucha piritita asociada a la alteración argílica avanzada en los niveles superiores del sistema.

## **INCLUSIONES FLUIDAS**

En la zona de Alteración de Domeyko, las vetillas tipo B se asocian a los eventos más tempranos de mineralización y alteración potásica del sistema ( $350^{\circ}$  a más de  $500^{\circ}\text{C}$ ) y las vetillas tipo D muestran asociación con eventos tardíos del sistema y se habrían formado a temperaturas de  $280^{\circ}$  a  $350^{\circ}\text{C}$ . Este hecho, calza con los estudios de inclusiones fluidas realizados por Gustafson y Hunt (1975), Zweng y Clark (1995) y Glenton et al. (2005) en otros sistemas porfiríticos cupríferos.

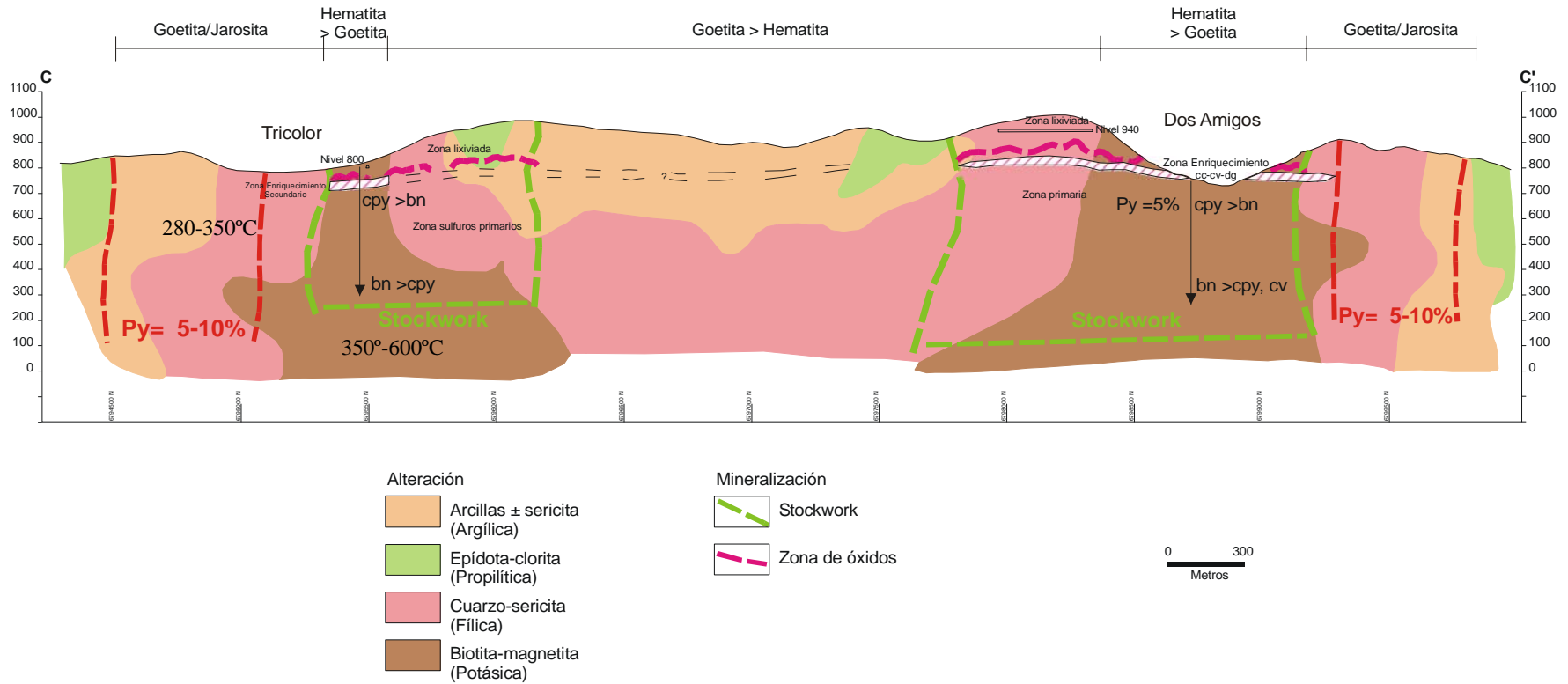
De acuerdo a estudios realizados por Gustafson y Hunt (1975) en el yacimiento porfirítico El Salvador. Las vetillas B se forman en el rango de  $350^{\circ}\text{C}$  a más de  $600^{\circ}\text{C}$  y con salinidades de 40% Na Cl que involucra un rango de presiones de 220 a más de 900 bars y la asocia a un ambiente de mineralización temprana con saturación de NaCl eq.

como producto de ebullición en el sistema, los cambios progresivos de las condiciones físicas durante el periodo transicional, implican participación de aguas meteóricas que enfrían el centro del sistema, este hecho, posiblemente sea por el cese de la actividad magmática que permite el descenso de la presión y temperatura. El relleno de inclusiones fluidas en las vetillas tipo B aparentemente reflejan, estos cambios de aguas a temperaturas y salinidades netamente magmáticas en condiciones hidrostáticas, a ambientes tardíos en condiciones de bajas presiones hidrostáticas y relativamente bajas temperaturas con dominio de aguas meteóricas. La alteración hidrotermal y mineralización tardía se forma luego de que el complejo intrusivo se enfrió suficientemente, probablemente abajo de 350°C. Las aguas meteóricas recalentadas en la cámara al contacto con la roca caja produce la destrucción del feldespató potásico, dando paso a la formación de vetillas tipo D (pirita) en un ambiente sericítico, con temperaturas de 200° a 350°C y salinidades de 12 a 15%.

En la zona de Alteración de Domeyko las vetillas tipo B tienen el rango de temperaturas de homogenización (350° a más de 500°C) calzan con las determinadas por Gustafson y Hunt (1975), las salinidades ( 10 a 28%) son más bajas que las definidas por estos autores. En cambio las vetillas tipo D si están en el rango definido para el pórfido El Salvador. Este hecho sugiere, que las vetillas tipo B se asocian a los eventos más tempranos de mineralización y alteración potásica del sistema y, las vetillas tipo D muestran asociación con eventos tardíos del sistema y se habrían formado a temperaturas de 280° a 350°C. Las altas salinidades en este evento, posiblemente sea por la sobreimposición de vetillas D sobre las vetillas B o el fenómeno de ebullición en el sistema pórfido, (existen algunas inclusiones ricas en vapor con agua, Foto 23).

Desafortunadamente el estudio preliminar de inclusiones fluidas de Dos Amigos es parcial y se registró solo una parte de la evolución de los fluidos hidrotermales participantes en el sistema.

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**ZONA DE ALTERACION DE DOMEYKO**  
 SECCION DE ALTERACION-MINERALIZACION C-C'  
 Viendo al este  
 Figura 38



**Figura 38:** Sección Geológica, muestra Alteración y mineralización del sistema.

## IX. CONCLUSIONES

- La Zona de Alteración de Domeyko está desarrollada principalmente en rocas volcánicas neocomianas del Grupo Bandurrias y en stocks de pórfidos tonalíticos a granodioríticos que las intruyen. Una roca biotitizada del sector de la mina Tricolor dio una edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en biotita de  $104.1 \pm 1.9$  Ma, lo que indica que la alteración hidrotermal y mineralización de Cu-Au asociada están ligadas temporalmente al emplazamiento de stocks de pórfidos tonalíticos a granodioríticos a fines del Cretácico Inferior (Albiano), ya que estos últimos han dado edades U-Pb en circón de  $104.0 \pm 3.5$  a  $108.5 \pm 3.4$  Ma en los sectores de las minas Dos Amigos y Tricolor.
- El extenso Batolito de la Sierra de Bandurrias de composición diorítica a tonalítica que limita por el oeste la Zona de Alteración de Domeyko no está alterado y ha dado una edad en U-Pb de  $95.2 \pm 1.3$  Ma que concuerda con la edad plateau  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en biotita de  $96.9 \pm 0.9$  Ma, la cual revela que el enfriamiento del batolito fue posterior al emplazamiento de los pórfidos y al desarrollo de la actividad hidrotermal de los depósitos de Tricolor y Dos Amigos.
- El efecto termal de la intrusión batolítica se registra en las micas de los depósitos adyacentes Dos Amigos y Tricolor, las que muestran espectros de edades aparentes  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  con gradientes de 97 a 105 Ma y 95 a 99 Ma consistentes con pérdida parcial de Ar durante el emplazamiento del batolito vecino. Sin embargo, no se puede descartar que algunas micas hidrotermales se hayan formado durante este evento.
- El emplazamiento de los pórfidos y el desarrollo de la zona de alteración en un área alargada en sentido norte-sur por 5,5 km y de 1,0 a 2,5 km de ancho ocurrió a lo largo de una zona de cizalle sinistral de rumbo N-S denominada Falla Dos Amigos, la que es paralela al Sistema de Falla de Atacama, pero que está ubicada unos 15 km al oriente de la traza principal



de dicho sistema estructural. Los antecedentes cinemáticos y cronológicos de la Falla Dos Amigos son coincidentes con los establecidos por otros autores para el Sistema de Falla de Atacama. Lo anterior puede significar que el Sistema de Falla Dos Amigos puede corresponder a una estructura subsidiaria del Sistema de Falla Atacama localizada más al este, una biotita secundaria de el pórfido Tricolor con efectos miloníticos asociado a la Falla Dos Amigos, indica una edad en  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $105.4\pm 3.3$  Ma.

- Existen dos centros de alteración potásica coincidentes con afloramientos de los pórfidos mineralizados, el de la mina Dos Amigos cubre un área de aproximadamente  $1,0\text{ km}^2$  y el de la mina Tricolor aflora en un área de  $0,3\text{ km}^2$ . Ambos se caracterizan principalmente por la asociación biotita-magnetita y que hacia afuera, está casi completamente obliterada por una amplia zona de alteración cuarzo-sericítica que envuelve a las anteriores. Hacia fuera gradada a una zona de arcillas-sericita y finalmente una zona propilítica con dominio de epidota, clorita y calcita. La parte superior del sistema que presenta cuerpos de brechas hidrotermales con matriz de turmalina, tiene una alteración argílica avanzada tardía (cuarzo-pirofilita-sericita-arcillas) y, dió una edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en sericita de espectro irregular, significativamente más joven que los pórfidos y los intrusivos del batolito, igual a  $85.8\pm 1.2$  Ma. La asociación espacial de las alteraciones potásica y argílica avanzada en el sistema Dos Amigos, sugiere sobreimposición (“telescoping”) de alteraciones en el sistema.
- La mineralización primaria de estos pórfidos de Cu-Au es de baja ley y solo son económicos en los casos que presentan una zona de enriquecimiento supergeno, como es el caso de los yacimientos Dos Amigos y Andacollo, consecuentemente el potencial de exploración de la faja de pórfidos del Cretácico Inferior corresponde a la eventual localización de zonas de enriquecimiento preservadas en otros posibles pórfidos que pueden estar ocultos por los depósitos de piedemonte de las Gravas de Atacama.

- Un análisis preliminar de inclusiones en venillas de cuarzo de tipo B del yacimiento Dos Amigos indican temperaturas de homogenización desde 350° a >500°C y salinidades de 10% a 28% de NaCl equivalente indicando que estas venillas se asocian a fluidos salinos de etapas tempranas de alta temperatura del sistema hidrotermal (alteración potásica), ligado al desarrollo de stockwork en el pórfido tonalítico Dos Amigos. Inclusiones en cuarzo de venillas de tipo D revelan temperaturas de homogenización entre 280° y 350°C y menor salinidad desde 5% a 15% NaCl equivalente. Indicando fluidos más diluidos en etapas más tardías del sistema hidrotermal (alteración cuarzo-sericita).
- La Zona de Alteración de Domeyko ha sido afectada por procesos de meteorización caracterizados por la sobreimposición de una alteración argílica supergena (caolinita-halloysita-montmorillonita) y ocurrencia de yeso y alunita secundarios. Además, en el yacimiento Dos Amigos resultó en una zonación vertical con una porción superior lixiviada de 100 a 200 m de espesor, la que en su porción superficial incluye un vistoso sombrero de hierro (gossan) con goetita-hematita y jarosita subordinada. En profundidad continúa una zona de óxidos irregular de 20 a 30 m de espesor con una asociación de crisocola-atacamita y escasa brocantita. Subyace a la anterior una zona de enriquecimiento secundario inmadura entre las cotas 740 y 820 m con la asociación calcosina-digenita-covelina que han reemplazado parcialmente a los sulfuros primarios; la zona de enriquecimiento constituye el mineral económico que se extrae de un rajo abierto en la mina Dos Amigos con alrededor de 1,0% Cu total. La zona primaria en profundidad es de baja ley de Cu-Au y en la zona de Tricolor no se ha detectado la presencia de una zona de enriquecimiento y solo se ha explotado una veta controlada por la Falla Dos Amigos.
- Los depósitos de Dos Amigos y Tricolor de acuerdo a sus características corresponden a pórfidos de Cu-Au ligados a intrusiones calco-alcálicas que representan actividad magmática tardía del arco magmático del Cretácico

Inferior. Ellos forman parte de una faja de pórfidos del Cretácico Inferior en la que también se ubica el pórfido de Andacollo en la IV Región, la que Llaumet, (1975) denominó "Faja Pacífica de pórfidos cupríferos y desarrollos hidrotermales". Esta faja de pórfidos se ubica geográficamente al oriente de la Franja Ferrífera Chilena.

## X. REFERENCIAS

Abad, E. 1976a. Geología de la Precordillera al noreste de Vallenar, entre latitudes 28° y 28°30´S, provincia de Atacama. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 213p. Santiago.

Abad, E. 1976b. Las formaciones Cerrillos y Hornitos al norte de Vallenar, provincia Atacama, Chile. In Congr. Geol. Chileno, No 1, Actas, Vol.1, p. A97-A114. Santiago, Chile.

Abad, E. 1977. Acerca de la paleografía neocomiana en la región al sur de Copiapó, provincia de Atacama, Chile. Asoc. Geol. Argent., Rev., Vol. 32, No 1, p.24-33.

Abad, E., 1980. Cuadrangulos estación Algarrobal, Yervas Buenas, Cerro Blanco, Merceditas y Tres Morros, Región de Atacama, Chile. Inst. Invest. Geol. Chile, No 38, 48p.

Aberg, G.; Aguirre, L.; Levi, B.; Nyström, J. 1984. Spreading subsidence and generation of ensialic marginal basin: An example from the Early Cretaceous of Central Chile. In Marginal basin geology (Kokelaar, B.P.; Howells, M.; editors). Geological Society of London, Special Publication, No. 16, p. 185-193.

Aguirre, L.; Egert, E. 1965. Cuadrangulo Quebrada Marqueza provincia de Coquimbo. Inst. Invest. Geol., Chile., No 23, 14 p.

Aberg, G.; Aguirre, L., Levi, B., Nystrom, J.O, 1984 Spreading Subsidence and generation of ensialic marginal basin: an example from the early Cretaceous of central Chile. In Marginal basin geology (Kokelaar, B.P.; Howells, M.F.; editors). Geological Society of London, Special Publication, No 16, P. 185-193.

Aguirre, L.; Egert, E. 1962. Las formaciones manganesíferas de la región de Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. Revista Minerale, No. 76, p. 25–37.

Alpers, C.N. and Brimhall, G.H., 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: evidence from supergene mineralization at La Escondida. Geological Society of America Bulletin, V. 100, pp. 1640-1656.

Ambrus, J., 1977. Geology of the El Abra Porphyry Copper Deposit, Chile Economic Geology, V. 72, pp. 1062-1085.

Ambrus, J., 1979. Emplazamiento y mineralización de los pórfidos cupríferos de Chile. Salamanca. Spain. Universidad de Salamanca 314-p.

Anderson, J. A. 1982. characteristics of leached capping and techniques of appraisal. In Advances in geology of the porohyry copper deposits, southern North America (Tittley, S.R.; editor). University of Arizona Press, P. 275-295. Tucson.

Arabasz, W. 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama fault zone in northern Chile. Ph. D. Thesis, Calif. Inst. Technol., 264 p. Pasadena.

Arancibia, O; Clark,A.H. 1996. Early magnetite-amphibole-plagioclase alteration-mineralization in the Island Copper porphyry copper-gold-molibdenum deposit. *Economic Geology*, Vol. 91, No. 2, p. 402-438. British Columbia.

Arévalo, C. & Grocott, J. 1997. The tectonic setting of the Chañarcillo Group and the Bandurrias Formation: an early-Late Cretaceous Transpressive Belt between the Coastal Cordillera and Precordillera, Atacama Region, Chile. *In: Proceedings of VIII Congreso Geológico Chileno, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 1, p. 1604-1607.*

Armijo, R., and Thiele, R., 1990, Active faulting in northern Chile: Ramp Stacking and lateral decoupling along a subduction plate boundary?: *Earth and planetary Science Letters*, v. 98, p. 40-61

Arribas, A., Jr., Hedenquist, J.W., Itaya, T., Okada, T., Cocepción, R.A., and Garcia, J.S., Jr., 1995, Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines: *Geology*, v. 23, p. 337-340.

Baker, M.C.W. (1977): Geochronology of upper Tertiary volcanic activity in the Andes of north Chile. *Geol. Rundschau Bd. 66 p.455 ff Stuttgart. Andes, Chile-norte geocronología, volcanología cenozoico, terciario*

Bambord, R.W., 1972, The Mount Fubilan (Ok Tedy) porphyry copper deposit, Territory of Papua and New Guinea: *Economic Geology*, V 67, p.1019-1033.

Boric, R., Díaz, F. y Maksaev, V., 1990. Geología de yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 40, Santiago, 246 p.

Bookstrom, A.A., 1977. The magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology*, V. 64, pp. 1101-1130.

Boutwell, J.M., 1905. *Economic Geology of the Bingham district Utah: U.S. Geological Survey Profesional Paper 38. 413 p.*

Browne, P.R.L., 1978, Hidrotermal alteration in active geothermal fields *Annual Reviewn of Earth and Planetary Sciences* , V. 6, p. 220-250.

Brown, M., Díaz, F. & Grocott, J. 1993. Displacement History of the Atacama Fault System, 25°00'S 27°00'S, Northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 105, p. 1165-1174.

Burnhan, C,W. 1985. Energy release in subvolcanic environments: Implications for breccia formation. *Economic Geology*, Vol. 80, p. 1551-1522.

Camus, F., 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, 267 p. Santiago de Chile.

Carten,1986; Dilles & Einaudi, 1992) Casamiquela, R.; Corvalan, J.,Franquesa, F., 1969. Hallazgo de dinosaurios en el Cretácico Superior de Chile. Su importancia cronológico-estratigráfica. Inst. Invest. Geol. (Chile), Bol., No 25, 31p.

Cembrano, J.; Lavenu, A.; Arancibia, G.; Sanhueza, A., and Reynolds, P., 1997. Coeval transpressional and transtensional magmatic arc tectonics in the southern Andes. VIII Congreso Geológico Chileno, Actas V. III, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, pp. 1613-1616.

Chávez Jr., W.X., 2000. Supergene Oxidation of Copper Deposits: Zoning and Distribution of Copper Oxide Minerals. SEG Newsletter Number 41, Lead Article, April 2000 Issue.

Chappell and White 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, Vol. 8. p. 173-174.

Cherniak, D.J., Watson, E.B., 2000, Pb diffusion in Zircon :Chemical Geology,v. 172, p. 5-24.

Clark, G.H.,1990, Panguna Copper-gold deposit, in Hughes, F.E., ed., Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea, v. 2: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Monograph 14, p. 1807-1816.

Clark, A.H., and Arancibia, O.N., 1995, The occurrence, paragenesis, and implications of magnetite-rich alteration-mineralization in calc-alkaline porphyry copper deposits, *in* Clark, A.H., ed., Giant Ore Deposits II: Controls on the Scale of Orogenic Magmatic-Hydrothermal Mineralization: Proceedings of the Second Giant Ore Deposits Workshop, April 25–27, 1995, Kingston, Ontario, Canada, Queen's University, p. 511–581.

Clark, A.H., Archibald, D.A., Lee, A.W., Farrar, E. And Hodgson, C.J., 1998. Laser Probe  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ages of Early-and Late-Stage Alteration Assemblages, Rosario Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Collahuasi District, I region, Chile. Economic Geology, V. 93, N° 3,p. 326-337.

Conn, H. 1974 Geología de la hoja chacritas, provincia de Atacama Chile, Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 90 p.Santiago.

Cooke. D.; Hollings, P.;Walshe,J. 2005; Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Control. Economic Geology. Vol. 100 No 5. p. 801-818.

Cornejo, P., Tosdal, R.M., Mpodozis, C., Tomlinson, A.J., Rivera, O., and Fanning, C.M., 1997. El Salvador, Chile, porphyry copper deposit revisited: Geologic and geochronological framework. International Geology Review, V. 39, p. 22-54.

Corvalan, J. 1974. Estratificación del Neocomiano marino al sur de Copiapó, provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol., Rev. Geol. Chile, No 1, p. 13-36.

Cox, D.P. 1985, Geology of the Tanama and Helecho Porphyry Copper Deposits and Vecinity Puerto Rico: United States Geological Survey, Professional Paper 1327, 59 p.

Cox, D.P. and Singer, D.A., 1988, Distribution of gold in porphyry copper deposits: United States Geological Survey, Open-file Report 88-46, 22 p.

Cuadra, P., Grez, E., y Gröpper, H., 1997. Geología del yacimiento Radomiro Tomic. VIII Congreso Geológico Chileno, Actas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, pp. 1918-1922.

Christopher, P.A., and Carter, N.C., 1976, Metallogeny and metallogeny epochs for porphyry mineral deposits: Canadian Institute of Mining and Metallurgy Special Volume 15, p.376-387.

Dallmeyer, R.D.; Brown, M.; Grocott, J.; Taylor, G.K.; Treloar, P.J. 1996. Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean plate boundary zone, 26°-27°30'S, North Chile: constraints from 40Ar/39Ar mineral ages. *Journal of Geology*, Vol. 104, p. 19-40.

Davidson, J., 1987. Tectonic and magmatic evolution of the southern Central Andes. In IUGS/UNESCO, Deposit Modeling Workshop, Hydrothermal System in Volcanic Terrains (Abstract), 3p.

Davidson, J., and Mpodozis, C., 1991, Regional geologic setting of epithermal gold deposits, Chile: *Economic Geology*, v. 86, p. 1174-1186.

Dewey, J.F., and Bird, J.M., 1970. Mountain belts and New Global Tectonics: *Journal of Geophysical Research*, v. 75, p. 2625-2647.

Davis, D.W., and Krogh, T.E., 2000, Preferential dissolution of <sup>234</sup>U and radiogenic Pb from recoil-damage lattice sites in zircon: Implications for thermal histories and Pb isotopic fractionation in the near surface environment: *Chemical Geology*, v. 172, p. 41-58.

Duffield, W.A. y Dalrymple G.B., 1990. The Taylor Creek Rhyolite of New Mexico: a rapidly emplaced field of lava domes and flows. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 52, p. 475-487.

Emparán, C.; y Pineda, G. 1999. Area Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No 12, 1 mapa escala 1:100.000 Santiago.

Emparan, C.; y Pineda, G. 2000. Area La Serena - La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No 18, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Ericksen, G.E., 1976. Metallogenic provinces of Southern Pacific Region. *Am. Assoc. of Petroleum Geologists Bull. Memoir* 25, pp. 527-537. Espinoza, S., 1981. Esbozo metalogénico del distrito de Michilla, II Región, Chile. Actas Primer Coloquio sobre Volcanismo y Metalogénesis, Depto. Geociencias, Univ. del Norte, Antofagasta, Chile, pp. 71-81.

- Enns, S.G., Thompson, J.F.H., Stanley, C.R., Land, J.R., 1995. The Gabree Creek porphyry copper-gold deposits, northwestern British Columbia: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Special Volume 46 p. 630-640.
- Fitton, J.G., D, James, P.D. Kempton, D.S. Ormerod, and W.P. Leeman, 1988, The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States, *J. Petrol., Spec Lithosphere Issue*, 331-349.
- Farrar, E.; Clark, H., Haynes, S. J.; et al., 1970; K-Ar evidence for the post-Paleozoic migration of granitic intrusion foci in the Andes of northern Chile. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 10, No 1, p.60-66.
- Florendo, F.F., 1994, Tertiary arc rifting in northern Luzon, Philippines: *Tectonics*, v. 13, p. 797-809.
- Fraser, T.M., Stanley, C.R., Nikic, Z.T., Pesalj, R., and Gorc, D., 1995. The Mount Polley alkalic porphyry copper-gold deposit, south-central British Columbia: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Special Volume 46, p. 609-622.
- Gana, p., 1991. Mapa Geológico de la Cordillera de la Costa entre La Serena y Quebrada el Teniente. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documento de trabajo, No 3, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Gajardo, A. 1976. Prospección y evaluación regional de depósitos de carbonato de calcio en la III Región, Atacama. *Inst. Invest. Geol.* (inédito), 203 p. Santiago.
- Gajardo, A. 1978. Distribución de estratos calcáreos y evaluación de su potencial económico en la secuencia sedimentaria neocomiana, III Región, Atacama, Chile. *Memoria de Título Univ. Chile, Depto. Geol.*, 174 p. Santiago.
- González, G., 1999. Mecanismo y profundidad de emplazamiento del Plutón de Cerro Cristales, Cordillera de la Costa, Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile* 26, 43-66.
- Gustafson L. B. Orquera W. McWilliams M., Castro. M., Rojas. G., Maluenda J. and M. Mendez, 2001.- Multiple centers of mineralization in the Indio Muerto District, El Salvador, Chile. *Economic Geology*, V. 96, N° 2, pp. 325-350.
- Gustafson, L.B. and Hunt, J.P., 1975. The Copper Porphyry deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, Vol.70, pp-857-912.
- Gustafson, L.B., and Quiroga, J., 1995. Patterns of Mineralization and Alteration below the Porphyry Copper Orebody at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, V. 90, pp. 2-16.
- Hedenquist, J.W. and Richards, J.P., 1998. The Influence of Geochemical Techniques on the Development of Genetic Models for Porphyry Copper Deposits. In: Richards, J.P. and Larson, P.B. (eds.) *Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology*. Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology*, V. 10, p. 235-256.



Heithersay, P.S., O'Neill, W. J., van der Helder, P., Moore, C.R., and Harbon, P.G., 1990, Goonumbla porphyry copper district-Endeavour 26 North, Endeavour 22 and Endeavour 27 copper-gold deposits: Australasian Institute of Mining and Metallurgy Monograph 14, p. 1385-1398.

Herrington, R.J., Jankovic, S., and Kozelj, D., 1998, The Bor and Majdanpek copper-gold deposits in the context of the Bor metallogenic Zone (Serbia, Yugoslavia), in Porter, T.M., ed., porphyry and hydrothermal copper and gold deposits. A global perspective. Perth. 1998. Conference Proceedings, South Australia. Australian Mineral Foundation. P. 169-178.

Hervé, M. 1987. Movimiento sinistral en el Cretácico Inferior de la Zona de Falla Atacama al norte de Paposo (24°S), Chile. Revista Geológica de Chile, No 31, p. 37-42.

International stratigraphic chart (2005). Interacional comisión de Stratigraphy, IUGS.

Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., 8:523-548.

Ishihara, S., 1981, The granitoid series and mineralization: Economic Geology, 75th Anniversary Volume, p. 458-484.

James, D.E. 1971 Plate tectonics model for the evolution of the central Andes; Geological Society of America Bulletin, v. 82, p. 3325-3346.

Jurgan, H. 1977 a. Zur Gliederung der unterkreide-serien in der Provinz Atacama, Chile. Geol. Rundsch., Vol, 66, No 2, p. 404-434.

Jurgan, H. 1977 b. Strukturelle und lithofazielle Entwicklungen des andinen Unterkreide-Beckens im nordern Chiles (Provinz Atacama). Geotekt. Forsch., No 52, p. 1-138.

Kay, S.M.; Mpodozis, C.; Titler, A.; Cornejo, P. 1994. Tertiary magmatic evolution of the Maricunga mineral belt in Chile. International Geology review, Vol. 36, No 36, No.12, p. 1079-1112.

Kosaka, H. and Wakita, K., 1978, Some geologic features of the Mamut porphyry copper deposit, Sabah, Malaysia: Economic Geology, v. 73, p. 618-627.

Kurtz, A.; Kay, S.; Charrier, R.; Farrar, E. 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente Region, central Chile (34-35° S). Revista Geológica de Chile, Vol. 24, No. 1, p. 73-90.

Lanphere, M.A. y Dalrymple, G.B., 1978. The use of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data in evaluation of disturbed K-Ar systems. U.S. Geological Survey Open-File Report 78-701, p. 241-243.

Le Bel, L., 1985, The Linga Super-unit: high-K diorites of the Arequipa segment of the Coastal Batholith of Peru. In Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J. and Beckinsale,

R.D., "Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes", Blackie, Glasgow & London, Halstead Press, New York, pp119-127

Llaumet, C. (1975). La Faja Pacífica de cobres porfídicos y desarrollos de lateración Hidrotermal de Chile. II Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, 2, P. 331-348.

Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits: *Economic Geology*, v. 65, p. 373-408.

Ludwig, K.R., 2001. SQUID 1.02, a user manual. Berkeley Geochronology Center, CA, special publication no. 4.

Marsh, T.M., Einaudi, M.T., and McWilliams, M., 1997,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Cu-Au and Au-Ag mineralization in the Potrerillos district, Chile: *Economic Geology*, v. 92, p. 784-806.

Marquardt, J. C., 1980, Estudio de la alteración y mineralización del yacimiento cuprífero Andacollo, IV Región: Unpub. thesis, Univ. Chile, Dept. Geología, 123 p.

Marschik, R., and Fontboté, L., 1996. Copper(-Iron) Mineralization and Superposition of Alteration Events in the Punta del Cobre Belt, Northern Chile. In: Camus, F., Sillitoe, R.H., and Petersen, R., eds. *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny*. Society of Economic Geologists, Special Publication Number 5, pp. 171-190.

McIntyre, G. A.; Brooks, C.; Compston, W.; Turek, A., 1966. The Statistical Assessment of Rb-Sr Isochrons. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 71, p.5459-5468.

Maksaev, V., 1990. Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° South, and the origin of major porphyry copper deposits. Unpublished Ph.D. Thesis, Halifax, Nova Scotia, Canada, Dalhousie University, 554 p.

Maksaev, V. and Zentilli, M., 1994. The Eocene - Oligocene belt of Porphyry Copper Deposits of Northern Chile. (Abstract) SEG Symposium: *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization Styles and Metallogeny*. 7<sup>o</sup> Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. 2, p. 1590, Concepción.

Maksaev, V.; Zentilli, M. 1999. Fission track thermochronology of the Domeyko cordillera, northern Chile: implications for Andean tectonics and porphyry copper metallogenesis. *Exploration and Mining Geology*, Special Issue on Latin American Mineral Deposits, Vol. 8, No 1-2, p. 65-89.

Maksaev, V. and Zentilli, M., 2002. Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: An Overview. In - Porter, T.M. (Editor), 2002 - *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, volume 2; PGC Publishing, Adelaide, Australia, pp. 185-205.

Makasev, V., 2003, Apuntes pórfidos cupríferos, Universidad de Chile.

Maksaev, V., Munizaga, F., Mc Williams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J., and Zentilli, M., 2004, New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U-Pb,  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , Re-Os, and fission-track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit: Society of Economic Geologists Special Publication 11, p.14-54.

Maksaev, V., Munizaga, F., Barra, F., Mc Williams, M.D. And Mathur, R., 2006. geochronology of Cretaceous Porphyry Copper Deposits of the Coastal Cordillera of Northern Chile (latitudes 26°30' to 30°30'S). Geological Society of America., Abstracts with program, Vol. 38, No 7, P. 347.

Marinovic, N., Smoje, I., Maksaev, V., Hervé, M., Mpodozis, C., 1995. Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Marschik, R. and Fonboté, L., 1996. Copper (-Iron) Mineralization and Superposition of Alteration Events in the Punta del Cobre Belt, Northern Chile. In: Camus, F., Sillitoe, R.H., and Petersen, R. ed. Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny. Society of Economic Geologists, Special Publication Number 5, pp. 171-190.

Mercado, M. 1977. Geología de la Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera. Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol., 73 p. Santiago.

Mercado, M. 1978a Avance geológico de la Hoja Caldera, Región de Atacama. Inst. Invest. Geol., Mapas Geol. Prelim. Chile, No 1, 13 p.

Mercado, M. 1978b Avance geológico de las Hojas Chañaral y Poterrillo, Región de Atacama. Inst. Invest. Geol., Mapas Geol. Prelim. Chile, No 2, 24 p.

Mercado, M. 1978c. Geología de la Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera. Región de Atacama. Inst. Invest. Geol., Mapas Geol. Prelim. Chile, No 2, 24 p.

Meyer, C.; Hemley, J.J. 1967. Wall rock alteration. In Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Barnes, H.L. ;editor). Holt, Rinehart and Winston, p. 166-235.

Montecinos D. P., 1983, Petrologie des roches intrusives associées au gisement de fer E1 Algarrobo (Chile): Unpub. Ph.D. thesis, Univ. Paris Sud Orsay, 191 p.

Mortimer, C. 1973. The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile. Geol. Soc. Lond., J., Vol. 129, Part 5, p. 505-526.

Moscoso, R. 1976. Antecedentes sobre un engranaje volcánico-sedimentario marino sedimentario del Neocomiano en el área de Tres Cruces IV Región Chile. In Congr. Geol. Chelno, No 1, Actas, Vol. 1, p. A 155-A167.

Moscoso, R 1977. Avance geológico de las Hojas Vallenar-La Serena, escala 1:250.000. Inst. Invest. Geol. (inédito), 39 p. Santiago.

Moscoso, R 1979a. Geología de una franja transversal en la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes a la latitud (29°S), Región de Atacama. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 166 p. Santiago.

Moscoso, R. & Covacevich, V. 1982. Presencia de sedimentitas triásico-jurásicas al sur de Canto del Agua, Cordillera de la Costa, Región de Atacama, Chile: descripción de la Formación Canto del Agua. *In* Congreso Geológico Chileno. 3, Actas, Vol. 3, p. 189-196. Concepción.

Moscoso, R. , Nasi, C., Salinas P (1982). Hoja Vallenar y parte norte de la Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. Carta Geológica de Chile No 55, escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Moscoso, R.; Padilla, H.; Rivano, S. 1982. Hoja Los Andes, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 52, 67 p.

Mpodozis, C.; Ramos, V.A. 1989. The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its relation to Hydrocarbon and Mineral Resources* (Ericksen, G.E.; Cañas, M.T.; Reinemud, J.A.; editors). Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, Vol. 11, p. 59-90.

Mpodozis, C.; Cornejo, P.; Kay, S.M.; Titler, A. 1995. La franja Maricunga: síntesis de la evolución del frente Volcánico Oligoceno-Mioceno de la zona sur de los Andes Centrales. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 22, No 2, p. 273-313.

Mpodozis, C. and Ramos, V., 1990. The Andes of Chile and Argentina. In: Ericksen, G.E., Pinochet, M.T, and Reinemund, J.A. (Editors). *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources: Houston, Texas, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences Series, V. 11, Chapter 5, pp. 59-91.*

Munizaga, F., Huete, C. , Hervé, F. 1985. Geocronología K-Ar y Razones iniciales  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de la "Faja Pacífica" de "Desarrollos Hidrotermales". LV congreso Geológico Chileno-Agosto 1985, pp 357-379.

Muntean, J.L.; Enaudi, M.T. 2000. Porphyry gold deposits of the Refugio district, Maricunga belt, Northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 95, No 7, p. 1445-1472.

Muntean, J.L.; Enaudi, M.T. 2001 Porphyry-epithermal transition: Maricunga belt, Northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 96, No 4, p. 743-772

Naranjo, J.A., Hervé, F., Prieto, X. and Munizaga, F., 1984. Actividad Cretácica de la Falla de Atacama al Este de Chañaral; milonitización y plutonismo. *Comunicaciones, Depto. Geología, Univ. de Chile, N°34, pp. 57-66.*

Naranjo, J. A. 1978. Geología del cuadrángulo Las Bombas y sector septentrional del cuadrángulo El Salado Región de Atacama. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 58 p. Santiago

Nash, J. Thomas, and Theodore, Ted G. 1971 Ore fluids in the porphyry copper deposit at Copper Canyon, Nevada *Economic Geology* 66: 385-399.

Nash, J.T., 1976 Fluid-Inclusion petrology; data from porphyry copper deposits and applications to exploration. U.S. Geological Survey Professional Paper, P0907, p. DD1-16.

Ojeda, O.A. 1990: Pendiente, sinuosidad y tipo de canal en el Ebro medio, Cuadernos de investigación geográfica, vol. XVI, 1-2, pp. 73-84.

Oyarzún, J. 1987, Rocas alcalinas, alcalinización metalogénica en formaciones del cretácicas de Chile nord-central Cong. Peruano Geol., 6th, Lima, 1987, Actas, p. 1-15.

Oyarzún, J. 1988, Algunos temas principales de la metalogénica Cretácicas en el Norte y Centro de Chile: Cong. Geol. Chileno, 5th, Santiago, 1988, Actas, v. 3, p. G37-G52.

Oyarzún, R.; Ortega, L.; Sierra, J.; Lunar, R.; 1996. The manto-type gold deposits of Anadacollo (Chile) revisited: A model based on fluid inclusion and geologic evidence. *Economic Geology*, Vol. 91, No 7, p. 1298-1309.

Pichowiak, S. 1994. Early to Early Cretaceous magmatism in the Coastal Cordillera and the Central Depression of north Chile. In: Reutter, K. J., Scheuber, E. & Wingger, P. J. (eds) tectonics of the Southern Central Andes. Heidelberg; Springer, pp. 203-218.

Padilla, R., Title, S.R. and Pimentel, F., 2001. Geology of the Escondida Porphyry Copper Deposit, Antofagasta region, Chile. *Economic Geology*, V. 96, N° 2, pp. 307-324.

Parry, W.T., Wilson, P.N., Jasumback, M.D., and Heizler, M.T., 1997; Clay mineralogy and Ar<sup>40</sup>/Ar<sup>39</sup> dating and argillic alteration at Bingham Canyon, Utah: Society of Economic Geologists Guidebook Series, v. 29, p. 171-188.  
Pettit (1987),

Perkins, C., Walshe, J.I., and Morrison, G., 1995, Metallogenic episodes of the Tasman fold belt system, eastern Australia: *Economic Geology*. V.90. p. 1443-1466.

Petford, N., and Atherton, M.P., 1994, Cretaceous-Tertiary volcanism and Syn subduction crustal extension in northern central Perú: Geological Society (London) Special Publication 81. p. 233-248.

Perelló, J.; Urzúa, F.; Ortiz, F. 1996. Clustered, gold-bearing oligocene porphyry copper and associated epithermal mineralization at La Fortuna, Vallenar region, northern Chile. In *Andean copper deposits; new discoveries, mineralization, styles and metallogeny* (Camus, F.; Sillitoe, R.H.; Petersen, R.; editors) Society of Economic Geologists, Special Publication; No 5, p. 81-90.

Potter, R., Clyne, M., Brown, D. 1978, Freezing Point Depression of Aqueous Sodium Chloride Solutions. *Economic Geology*. V. 73, No 73. pp. 284-285.

Rogers, G.; Hawkesworth, C.J. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes.

Perelló, J., Urzúa, F., Cabello, J., and Ortiz, F., 1996, Clustered, gold-bearing Oligocene porphyry copper and associated epithermal mineralization at La Fortuna, Vallenar region, northern Chile, in Camus, F. Sillitoe, R.H., and Petersen, R., eds., Andean Copper deposit: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny: Society of Economic Geologists Special Publication 5, p. 81-90.

Presnall, R.C. 1997. Structural controls on the plutonism and metallogeny in the Wasatch and Oquirrh Mountains, Utah: Society of Economic Geologist Guidebooks Series, v. 29, p. 1-10.

Randall, E., Taylor, G., Grocott, J. 1996, Major Crustal rotations in the Andean margin: Paleomagnetic results from the Coastal Cordillera of northern Chile. Journal of Geophysical Research, v. 101, No B7. p. 15, 783-798.

Reynolds, P.; Ravenhurst, C.; Zentilli, M. and Lindsay, D., 1998. High precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of two consecutive hydrothermal events in the Chuquibambilla porphyry copper system, Chile. Chemical Geology, Vol. 148, pp. 45-60.

Reyes, M. 1991. The Andacollo strata-bound gold deposit, Chile, and its position in a porphyry copper-gold system. In special issue devoted to gold deposits in Chilean Andes (Sillitoe, R.; Camus F.; editors). Economic Geology, Vol 86, No 6, p. 1301-1316

Reijs, J., and McClay, K., 1998. Salar Grande pull-apart basin, Atacama Fault System, northern Chile. In: Holdsworth, R.E.; Strachan, R.A. and Dewey, J.F. (editors). Continental Transpressional and Transtensional Tectonics. Geological Society of London, Special Publications, 135, pp. 127-141.

Reutter, K. J. (1974): Entwicklung und Bauplan der chilenischen Hochkordillere im Bereich  $29^\circ$  südlicher Breite.- Neues Jahrb. Geol. Paleontol, Abh., Vol. 146, No. 2, p. 153-178.

Reutter, K., Scheuber, E., and Helmcke, D., 1976. Structural evidence of orogen-parallel strike-slip displacements in the Precordillera on northern Chile: Geologische Rundschau, V. 80, pp. 135-153.

Richard, J.P.; Boyce, A.; Pringle, M. 2001. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry copper mineralization. Economic Geology, Vol. 96, No. 2, p. 271-305.

Righter, K. and Carmichael, I.S.E., 1992. Hawaiites and related lavas in the Atenguillo graben, western Mexican Volcanic Belt. Geological Society of America Bulletin, 104, 1592-1607.

Ringwood, A.E., 1990, Slab-mantle interactions; 3. Petrogenesis of intraplate magmas and the structure of the upper mantle: Chemical Geology, v. 82, p. 187-207.

Rivera y Mpodozis.1991. Volcanismo explosivo del terciario inferior en la precordillera de Copiapó, Región de Atacama, Chile: Las Calderas, Lomas Bayas y el Durazno, 6º Congreso Geológico Chileno, p.213-216.

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, V. 12, 644 p.

Sapiie, B., and Closs, M.,1995, Strike-slip faulting and related veining in the Grasberg porphyry Cu-Au ore system, Gunung Bijih (Ertsberg) mining district. Irian Jaya, Indonesia (West New Guinea) (Abs): *Geological Society of America Abstract with program*, v 27, p A 377.

Scheuber, E., González, G., 1999. Tectonics of the Jurassic–Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (228–268S): a story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18, 895–910.

Scheuber, E. and Andriessen, P.A.M., 1990. The kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile. *Journal of Structural Geology*, V. 12, No 2, pp. 243-257.

Scheuber, E. and Reutter, K.J., 1992. Magmatic arc tectonics in the Central Andes between 21° and 25°S. *Tectonophysics*, V. 205, pp. 127-140.

Shayakubov, T., Islamov, F., Golavanov, I., Kashirsy, S., Kremenetsky, A., and Minzer, E., 1999, Almalyk and Saukbulak ore fields, in Shayakubov, T. Islamov, F., Kremenetsky,A. and Seltman, R., eds., Au, Ag and Cu deposits of Uzbekistan. *Excursion Guidebook. Excursion B6 of the joint SGA-IAGOD Symposium, London/Tashkent, 1999: Potsdam Germany Interantional Geological Correlation Project Publication 11, p. 75-90.*

Simon, G., Kesler, S.E. and Essene, E.J.,2000: Gold in Porphyry copper deposits:experimental determination of the distribution f gold in the Cu-Fe-S system at 400° a 700°C: *Economic Geology*, v.95,p. 259-270.

Segerstrom, K. 1960a. Cuadrángulo Quebrada Paipote, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, No 3, 35 p.*

Segerstrom 1960b. Cuadrángulo Llampos, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile, No 4, 41 p.*

Segerstrom, K. 1963 Engranaje de sedimentos calcáreos con rocas volcánicas y clásticas en el Neocomiano del Geosinclinal Andino. *Soc.Geol. Chile, Simp. Geosinclinal Andino, No 1, 6 Santiago.*

Segerstrom, K. & Parker, R.L. 1959. Cuadrángulo Cerrillos, escala 1: 50.000. Provincia de Atacama, *Instituto de Investigaciones Geológicas, 1, 33 p.*

Segerstrom, K. & Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó, escala 1: 50.000. Provincia de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, 3, 115 p.*

Segerstrom, K. (1968): Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado Provincia de Atacama. Inst. Invest. Geol. Bol. Bd. 24 p.1-58 Santiago. Atacama, Chile, Copiapó, Mapa geológica, Estratigrafía

SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile; versión digital, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003) Santiago.

Silberman, M.L., 1985, Geochronology of hydrothermal alteration and mineralization: Tertiary hydrothermal precious-metal deposits in the Great Basins: U.S. Geological Survey Bulletin 1646, p. 55-70.

Sillitoe, R.H., Mortimer, C. and Clark, A.H., 1968. A chronology of landform evolution and supergene mineral alteration, southern Atacama Desert Chile: Trans. Inst. Mining Metall., Section B, V. 77, pp. 166-169.

Sillitoe, R.H., 1973a. The tops and bottoms of porphyry copper deposits. Economic Geology, V. 68, pp. 799-815.

Sillitoe, R.H., 1976. Andean mineralization a model for the metallogeny of convergent plate margins. In: Strong, D.F. (Editor) Metallogeny and plate tectonics, Geol. Assoc. Canada, Special Paper, No 14, pp. 59-100.

Sillitoe, R.H. and Khan, S.N., 1977, Geology of the Saindak porphyry copper deposit, Pakistan: Institution of Mining and Metallurgy, Transactions, v. 86, p. B27-B42.

Sillitoe, R.H., 1979, Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits: Mineralium Deposita, v. 14, p. 161-174.

Sillitoe, R.H. and Gappe, I.M., Jr., 1984, Philippine porphyry copper deposits: Geologic setting and characteristics: United Nations ESCAP, CCOP Technical Publication 14, 89p.

Sillitoe, R.H. and Angeles, C.A., Jr., 1985, Geological characteristics and evolution of a gold-rich porphyry copper deposit at Guinaoang, Luzon, Philippines, *in* Asian Mining '85: Institution of Mining and Metallurgy, London, p. 15-26.

Sillitoe, R.H. 1989 Gold deposits in western Pacific island Arcs: the magmatic connection. In The Geologic of gold deposits: the perspective in 1988 (Keay, R.R.; Ramsay, R.H.; Groves, D.I., editors), Economic Geology, Monograph, No 6, p. 274-291.

Sillitoe, R.H., 1993. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications. In: Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., 60 eds., Mineral Deposit Modelling, Geological Association of Canada, Special Paper 40, pp. 465-478.

Sillitoe, R.H. 1995a. Exploration of porphyry copper lithocaps. In Proceeding of the 1995 PACRIM Congress; Exploring the rim (Mauk, J.L. et al.; editors). Publication Series-



Australasian, Institute of Mining and Metallurgy, Vol 9, No 95, p.527-532. Auckland, New Zealand.

Sillitoe, R.H., and McKee, E.H., 1996. Age of Supergene Oxidation and Enrichment in the Chilean Porphyry Copper Province. *Economic Geology*, V. 91, pp. 164-179.

Sillitoe, R.H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region: *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 44, p.373-388.

Sillitoe, R.H. 1998. Major regional factors favouring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits, in Porter, T.M., ed *Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits. A Global Perspective*, Perth, 1998. Conference Proceedings: Melbourne, Australasian Institute of Mining and Metallurgy. P. 14.89 p.

Sillitoe, R.H., 1999. Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in porphyry and epithermal environments, in Pacrim '99 Congress, Bali, Indonesia, 1999, Proceedings: Melbourne. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 29-44.

Sillitoe, R.H., 2000. Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery: *Reviews in Economic Geology*, v. 13, p 315-345.

Sillitoe, R.H., 2005, *Supergene Porphyry Copper and Related Deposits*, Society of Economic Geology Inc. *Economic Geology 100 th Anniversary Volume*, pp. 723-768.

Stacey, J. S.; Kramers, J. D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 26, p.207-221.

Steiger, R.H. y Jager, E., 1977. Subcommission on Geochronology IUGS; convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planetary Science Letters*, V. 36, No3, pp. 359-367.

Streckeisen, A., 1978, IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites, and melilitite rocks. Recommendations and suggestions: *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, v. 143, p. 1-14.

Sun, Shen-su and McDonough, W. F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of oceanic basalts: implications for Mantle Composition and Processes. In A.D. Saunders and M.J. Norry (eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*, Spec. Publ. Vol. Geol. Soc. Lond., No. 42, pp. 313-345.

Taylor, G.K., Grocott, J., Pope, A., Randall, D.E., 1998. Mesozoic fault systems, deformation and fault block rotation in the Andean forearc: a crustal scale strike-slip duplex in the Coastal Cordillera of northern Chile. *Tectonophysics* 299, 93-109.

Thiele, R. & Pincheira, M. (1987): Tectónica transpresiva y movimiento de desgarre en el segmento sur de la zona de falla Atacama, Chile. -Revista Geol. de Chile, No. 31: p. 77-94.

Uyeda, S., 1987. Chilean vs Mariana type subduction zones with remarks on arc-volcanism and collision tectonics. In: Monger, J.W.H. and Francheteau, J., (Editors), Amer. Geophys. Union - Geol. Soc. of America, Geodynamic Series, V. 18, pp. 1-7.

Uyeda, S. and Nishiwaki, C., 1980. Stress field, metallogenesis and mode of subduction. In: Strangway, D., (Editor), The continental Crust and Its Mineral Resources, Geological Association of Canada, Special Paper 20, pp. 323-339.

Van Nort, S.D., Atwood, G.W., Collinson, T.B., Flint, D.C. and Potter, D.R., 1991, Geology and mineralization of the Grasberg porphyry copper-gold deposit, Irian Jaya, Indonesia: Mining Engineering, v. 43, p. 300-303.

Véliz, H., (1994). Geología e implicancias metalogénicas del sistema de fallas de Atacama, entre las quebradas El Desesperado y La Chimba. II Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título (inédita). Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.

Vila, T., 1991. Epithermal silver-gold mineralization at the Esperanza area, Maricunga Belt, high Andes of northern Chile. Revista Geológica de Chile, V. 18, N° 1, pp. 37-54.

Vila, T., and Sillitoe, R.H., 1991. Gold-rich porphyry systems in the Maricunga belt, northern Chile. Economic Geology, V. 86, pp. 1238-1260.

Vila, T., Lindsay, N. And Zamora, R, 1996. Geology of Manto Verde Copper Deposit, Northern Chile: A Specularite-Rich, Hydrothermal-Tectonic Breccia Related to the Atacama Fault Zone. In: Camus, F., Sillitoe, R.H., and Petersen, R. end. Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny. Society of Economic Geologists, Special Publication Number 5, pp. 157-170.

Vivallo, W., Espinosa, S., and Henríquez, F., 1993. Magnetite-apatite type iron-ore and gold mineralization in the Cerro Negro Norte district, Chile. In: Fenoll Hach-Ali, P., and Gervilla, F., eds., Current Research in Geology Applied to Ore deposits: Granada, España, Universidad de Granada, pp. 587-590.

Vivallo, W., Espinosa, S., y Henríquez, F., 1994. Geología y mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó – Chile: Revista Geológica de Chile, V. 21, Mo.2, pp. 197-212.

Vivallo, W.; Henríquez, F. 1998. Génesis común de los depósitos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 25, p. 199-228.

Walshe, J.L.; Heithersay, P.S.; and Morrison, G.W., 1995. Toward an understanding of the metallogeny of the Tasman fold belt system: Economic Geology, v. 90, p. 1382-401.

- Williams, W.C. 1992. Magmatic and structural controls on mineralization in the Paleocene magmatic arc between 22°40' and 23° 45' south latitude, Antofagasta. Ph. D. Thesis (Inédito) University of Arizona, 182 p. Tucson.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, *Chemical Geology*, 20 (4), p. 325-343.
- Yang, T.F., Lee, T., C-H., Cheng, S-N., Knittel, U., Punongbayan, R.S., and Rasdas, A.R., 1996 A double island arc between Taiwan y Luzon: consequence of ridge subduction: *Tectonophysics*, v. 258, p.85-101.
- York, D., 1969. Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 5, p.320-324.
- Zentilli, M. 1974. geological evolution and metallogenetic relationships in the Andes of northern Chile, Between 26° and 29° south Ph.D. Thesis, Queen's Univ., 446 p. Kingston, Canada.
- Zentilli, M., Leiva, G., Rojas, J., and M.C., 1994A. The Chuquicamata system revisited (Extended Abstract). Society of Economic Geologists Symposium, Copper Deposits of the Andes, New developments, Concepción Chile, October 17-18, 1994, Proceeding 2, p. 1647-1651.
- Zvezdov, V.S., Migachev, I.F., and Girfanov, M.M.1993. Potphyry copper deposits of the CIS and models of their formation: *Ore Geology Reviews*, v. 7, p. 511-549.
- Zweng, P.L., and Clark, A.H., 1995 Hypogene Evolucion of the Toquepala Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Southeastern Perú. Inc: Wahl, F., and Bolm, G.B. eds., *Porphyry Copper Deposit of the American Cordillera*. Arizona Geological Society Digest 20, pp. 556-612.

# **Anexo I**

# TABLA I

UBICACIÓN DE MUESTRAS EN COORDENADAS UTM DE LOS DIFERENTES ESTUDIOS REALIZADOS							
MUESTRA	ESTE	NORTE	COTA	MUESTRA	ESTE	NORTE	COTA
<b>SECCIONES DELGADAS</b>				<b>DIFRACCION DE RAYOS X</b>			
TRI-01	316614	6794702	917	TRI-04	316701	6794304	910
TRI-02	316620	6794645	923	TRE-07	316826	6794766	1018
TRI-K2	317000	6795492	858	TRW-1	316868	6796229	828
TRI-S1	317641	6794363	982	447722	316684	6795522	812
TRI-S2	317428	6794391	1028	MA-08	317306	6792516	1010
TRI-K4	317418	6794608	965	DAN-07	317125	6792523	943
DAS-1	316967	6791702	826	MA-04	317254	6793079	1036
TS-1	316750	6792230	741	DAE-02	317341	6792233	865
TS-2	316696	6792211	718	DAE-3	317312	6792255	851
TN-1	316805	6792467	901	DAS-2	317131	6791327	836
DAS-8	317641	6792528	963	TS-03	316644	6792156	741
447709	316827	6792071	720	DAS-13	316845	6791905	768
TC-03	316868	6792138	780	<b>ANALISIS DE ROCA TOTAL</b>			
DAE-01	317576	6792233	958	TRE-01	319031	6795238	916
DAS-12	316845	6791905	768	MT-01	316690	6793762	880
DAS-16	316896	6791879	802	MT-05	316499	6794123	845
DAE-4	317320	6792261	873	TIR-05	316643	6794289	884
DAS-7	317176	6791970	826	TRI-K	316937	6795531	847
DAE-5	317187	6792242	840	TRI-K3	317355	6794456	1021
DAS-10	317000	6791847	836	TC-02	316896	6792134	718
DAN-01	316934	6792583	979	TRI-K2	317000	6795492	858
DAN-08	316685	6792329	841	KP - 10	317100	6795480	900
DAN-11	316752	6792355	857	KP - 13	316864	6792032	730
DAN-12	316719	6792369	863	KP - 14	316865	6792232	739
MA-02	317411	6793153	1035	KP - 20	317355	6794456	745
MA-03	317229	6793177	1032	KP - 25	316912	6795502	685
MA-05B	317392	6793022	1087	<b>INCLUSIONES FLUIDAS</b>			
MA-09	317204	6792708	1014	DAS-5	317926	6792487	971
MA-10	317162	6792736	982	DAE-05	317255	6792299	871
TRE-02	316943	6794737	993	DAN-13	316691	6792406	861
TRE-03	316905	6794578	985	DAE-5	317187	6792242	840
TRE-04	316813	6794419	972	<b>SECCIONES PULIDAS</b>			
TRE-05	316769	6794575	985	TRI-K1	317029	6795573	846
TRE-06	316751	6794732	1005	TS-4	316710	6792049	720
MT-02	316837	6793820	898	DAS-15	316694	6792020	748
DAS-6	316814	6793067	1006	MA-05A	317245	6793000	1070
				LMA-01	316941	6792994	919
				LMA-04	316941	6792994	919

## TABLA II

### CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE ROCA TOTAL

FECHA:13/12/2004

	MT-01	MT-05	TRE-1	TRI-K	TRI-K2	TRI-K3	TC-02	TIR-05
SiO <sub>2</sub> %	59.23	65.19	50.76	71.03	63.92	63.34	60.28	54.73
TiO <sub>2</sub>	0.74	0.95	0.81	0.29	0.71	0.44	0.79	0.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.01	15.19	17.06	12.60	15.85	17.01	18.89	18.32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.46	2.19	11.24	7.31	2.67	4.10	1.37	6.68
FeO	2.36	2.52	1.12	0.16	2.48	0.80	3.08	2.00
MnO	0.38	0.08	0.22	0.01	0.04	0.04	0.07	0.31
MgO	3.86	1.45	0.66	0.09	2.73	1.95	3.57	3.87
CaO	7.68	3.09	9.14	1.21	2.08	3.64	1.20	7.80
Na <sub>2</sub> O	4.53	3.41	1.60	3.88	4.53	3.76	6.22	3.94
K <sub>2</sub> O	0.61	4.98	5.19	0.87	2.23	1.32	2.44	0.23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.17	0.15	0.01	N/D	0.01	N/D	0.17
PPC	0.81	0.59	1.74	2.41	2.33	3.38	1.68	0.97
TOTAL	99.83	99.81	99.69	99.87	99.57	99.79	99.59	99.92
Lappm	10	28	9	6	13	17	8	10
Ce	25	77	24	13	29	34	15	29
Nd	15	40	16	6	18	15	7	21
Sm	3.28	8.85	3.85	1.04	4.61	3.62	1.39	6.64
Eu	1.22	1.38	1.08	0.30	1.20	1.27	0.52	2.40
Gd	3.47	8.50	3.89	0.77	5.10	3.83	1.88	8.23
Dy	3.36	7.32	4.57	0.95	5.19	4.07	2.30	7.87
Ho	0.67	1.48	0.93	0.23	1.10	0.78	0.51	1.55
Er	1.95	3.70	2.69	0.68	2.89	2.05	1.51	3.90
Yb	1.88	3.77	2.80	0.68	2.93	2.14	1.50	3.89
Lu	0.26	0.57	0.42	0.10	0.44	0.30	0.22	0.57
Y	18	36	23	6.0	29	24	13	45
Sc	28	13	27	3.6	26	13	30	36
Nb	3.8	17	4.5	2.5	3.8	3.8	3.2	2.5
Th	1.6	9.2	2.0	2.2	1.8	3.2	1.3	1.6
Hf	2.4	12	2.8	1.8	2.6	2.2	2.6	2.7
Zn	181	43	141	28	80	107	54	270
Co	15	13	11	3	11	12	10	30
Ni	9	6	11	2	8	2	9	8
Ba	100	530	1520	70	138	250	290	150
Cr	36	77	247	112	29	3	39	154
V	217	88	196	53	170	76	183	277
Cu	2	36	31	248	1740	270	1950	357
Sr	365	272	168	73	140	370	216	630
Zr	80	426	120	48	90	75	89	77

JAIME MARTINEZ S (Universidad de Chile)

- MT-01 Dique granodiorítico. Alteración Propilitica
- MT-05 Granodiorita inalterada del Batolito.
- TRE-1 Roca volcanica, andesita del grupo Bandurrias.
- TRI-K Pórfido Tricolor cuarzo diorítico, alteración potásica.
- TRI-K2 Pórfido Tricolor cuarzo diorítico, alteración potásica.
- TRI-K3 Pórfido Tricolor cuarzo diorítico, alteración potásica.
- TC-02 Pórfido Dos Amigos, alteración Potásica.
- TIR-05 Dique diorítico,color negro.

No muestra	Este	Norte	Cota	Au	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Mn	Fe	As	Sr	Sb	V	Ca	Mg	Ba	Al	Na	K
				ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	ppm
447701	317057	6792362	781	0.26	19	3212	13	110	1	745	3.72	11	203	2.5	70	1.09	1.27	295	7.67	2.82	1.44
447702	316716	6792146	736	0.09	14	1761	18	117	0.8	255	5.03	5	178	2.5	64	0.7	1.15	181	8.16	2.51	1.51
447703	316644	6792156	741	0.06	14	200	14	66	0.25	49	10.4	35	440	2.5	80	0.11	0.14	1981	6.72	0.28	3.62
447704	316636	6792106	740	0.01	1.5	1529	11	31	0.25	54	4.93	8	84	2.5	83	0.1	0.27	35	8.18	0.25	3.38
447705	316710	6792049	720	0.16	6	1626	14	97	0.25	219	4.14	2.5	132	2.5	52	0.45	0.68	65	7.44	1.47	2.27
447706	316805	6792467	901	0.01	34	89	22	6	0.25	27	6.75	12	103	2.5	78	0.13	0.15	210	7.02	0.18	1.32
447707	317688	6792999	1052	0.34	3	154	29	29	0.5	43	6.83	107	401	8	209	0.29	0.12	1769	7.24	0.17	2.35
447708	317641	6792528	963	0.01	5	182	76	25	0.25	258	7.65	151	231	2.5	89	0.59	0.42	777	5.46	0.15	1.43
447709	316827	6792071	720	0.11	27	3535	18	147	0.9	514	4.75	10	97	2.5	56	0.34	1.17	61	7.45	1.48	2.55
447710	317076	6792067	768	0.09	72	6457	13	171	0.25	342	4.29	2.5	100	2.5	140	0.37	1.54	305	8.82	2.43	1.8
447711	317514	6791890	905	0.02	1.5	116	136	111	1	48	4.36	8	217	2.5	161	0.24	0.18	597	8.23	0.25	1.3
447712	316845	6791905	768	0.02	15	1470	12	50	2.5	49	6.54	5	100	2.5	74	0.15	0.17	29	7.92	1.63	2.51
447713	317255	6792299	871	0.11	20	196	15	47	2.5	52	6.35	6	96	2.5	70	0.15	0.16	22	7.58	1.58	2.43
447714	316847	6792373	851	0.06	28	314	<5	88	2.5	221	7.29	17	157	2.5	101	0.13	0.31	359	8.89	0.37	2.36
447715	317229	6793177	1032	0.04	2	831	<5	9	2.5	6	5.31	38	113	2.5	169	0.14	0.12	113	8.57	0.81	1.61
447716	317599	6792976	1096	0.01	1.5	36	26	14	2.5	112	4.9	40	279	2.5	153	0.34	0.26	1117	6.3	0.12	1.69
447717	316941	6792994	919	0.03	7	339	9	675	2.5	424	2.94	13	103	2.5	178	0.48	1.52	159	8.02	0.93	2.07
447718	316941	6792994	919	0.05	3	1267	<5	19	2.5	26	7.11	66	80	2.5	210	0.1	0.18	130	10.34	0.82	1.48
447719	317101	6792912	968	0.07	41	906	6	7	2.5	29	12.96	67	47	2.5	84	0.04	0.2	35	6.48	0.19	1.54
447720	316891	6793757	909	0.03	1.5	146	19	12	0.8	72	4.3	26	142	2.5	125	0.08	0.03	257	7.91	0.2	3.1
447721	316943	6795505	839	0.88	7	622	2.5	58	0.5	208	7.5	7	65	2.5	64	0.55	0.23	101	4.43	1.13	1.05
447722	316684	6795522	812	0.22	3	10000	16	70	1.8	144	4.98	13	86	2.5	114	0.17	0.39	275	8.12	0.97	2.09

**Descripción rocas DOS AMIGO ICP**

447701	Pórfido con alt. potásica, pirita, vetillas de cuarzo-calcopirita en el rajo.
447702	Pórfido con alteración potásica
447703	Pórfido con alteración filica.
447704	Pórfido con alteración filica.
447705	Pórfido con alteración potásica, vetillas de cuarzo-calcocita-calcopirita.
447706	Pórfido con alteración filica, vetillas de cuarzo-Oxidos de Hierro.
447707	Alteración filica, textura, esquistosa, Silica vuggy.
447708	Pórfido? con alteración filica, fracturas con goetita.
447709	Pórfido con alteración potásica vetillas de biotita-magnetita pirita.
447710	Pórfido con vetillas de Biotita(cloritas), inicio enriquecimiento.
447711	Bxa volcanica?, alteración argilica avanzada, hematita en fracturas.
447712	Pórfido con alteración potásica, vetillas de pirita-calcocita.
447713	Dique andesítico con pirita diseminada.
447714	Pórfido con alteración potásica.
447715	Brecha hidrotermal, alteración argilica avanzada, zona lixiviada.
447716	Brecha hidrotermal, alteración argilica avanzada, zona lixiviada.
447717	Brecha hidrotermal con matriz de turmalina, alteración filica.
447718	Brecha con matriz de turmalina, alteración filica-pirita.
447719	Brecha de turmalina, pirita, alteración filica.
447720	Estructura silicificada. En cajas propilitizadas,
447721	Pórfido diorítico, alteración potásica.
447722	Pórfido diorítico, alteración potásica. Labor minera Tricolor.

**TABLA III**

# TABLA IV

DOS AMIGOS											
MUESTRA	ESTRUC.	Th (°C)	Tm(°C)	TmC(°C)	NaCl%eq	Tam.(um)	%vapor	Tipo	Observaciones		
TN-4	VET. D	372,9	4,6	3,778	6,109	10	5	P	BIFASICO		
		380,5	3,4	2,662	4,420	15	10	P	BIFASICO		
		375,2	5,6	4,708	7,447	10	10	P	BIFASICO		
		340,8	3,4	2,662	4,420	5	5	P	BIFASICO		
		345,4	4,6	3,778	6,109	5	8	P	BIFASICO		
		385,6	6,4	5,452	8,473	10	7	P	BIFASICO		
		312,8	5,6	4,708	7,447	5	5	P	BIFASICO		
		350,0	9,8	8,614	12,436	8	12	p	BIFASICO		
		345,6	12	10,66	14,687	6	15	p	BIFASICO		
		305,6	9,8	8,614	12,436	5	20	p	BIFASICO		
		312,8	8,7	7,591	11,221	4	5	p	BIFASICO		
		DAE-05	VET. B	475,0	18,8	18,612	21,656	10	8	P	EN VETILLA TIPO B,MONOFASICO
				343,5	23,5	23,265	24,875	8	5	P	EN VETILLA TIPO B,MONOFASICO
472,0	23,9			23,661	25,133	5	5	P	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
473,0	22,8			22,572	24,418	10	10	P	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
473,0	20,2			19,998	22,659	10	10	P	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
473,0	21,5			21,285	23,553	15	10	P	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
435,8	10,2			10,098	14,091	20	20	p	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
510,0	10,6			10,494	14,512	10	15	p	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
500,0	8,9			8,811	12,662	10	25	p	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
480,0	5,6			5,544	8,598	10	35	p	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
480,0	7,8			7,722	11,380	10	20	p	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
432,0	8,2			8,118	11,855	8	15	p	EN VETILLA TIPO B,BIFASICO		
VET. D	325,6			5,8	5,742	8,863	5	5	P	EN VETILLA D, MONOFASICO	
	346,8			12,6	12,474	16,503	5	10	P	EN VETILLA D, MONOFASICO	
	289,8		8,8	8,712	12,549	8	10	P	EN VETILLA D, MONOFASICO		
	302,4		14,4	14,256	18,142	10	5	P	EN VETILLA D, MONOFASICO		
	346,2		4,5	4,455	7,089	10	10	P	EN VETILLA D, HALITA ?		
TS-4	VET. D		360,5	8,6	8,514	12,320	5	10	P	Trifasica	
			356,4	9,5	9,405	13,333	8	5	P	Bifasica	
		355,3	9,8	9,702	13,661	7	5	P	Bifasica		
		350,4	3,2	3,168	5,197	10	10	P	Trifasica		
		357,8	7,4	7,326	10,897	15	10	P	Trifasica		
DAN-2	VET. B	363,5	1,7	1,683	2,861	5	8	S	Monofasica		
		360,8	14,5	14,355	18,230	10	10	P	crystal de czo, monof.		
		361,2	17,1	16,929	20,371	10	15	P	Monofasica		
		510,0	15,4	15,246	18,998	15	10	P	Monofasica		
		510,0	16,2	16,038	19,656	5	5	P	Monofasica		
		357,4	14,2	14,058	17,967	10	10	P	Monofasica		
		510,0	15,8	15,642	19,329	5	20	P	Bifasica		
		485,0	12,4	12,276	16,312	10	10	P	Bifasica		
		510,0	13,2	13,068	17,065	10	20	P	Bifasica		
DAN-11	VET. B	327,8	12,6	12,474	16,503	10	10	P	Bifasica		
		332,5	8,5	8,415	12,204	10	13	P	Bifasica		
		334,4	9,8	9,702	13,661	5	14	P	Bifasica		
		336,4	9,4	9,306	13,223	5	14	P	Bifasica		
		342,6	10,2	10,098	14,091	5	16	P	Bifasica		
		422,6	10,6	10,494	14,512	10	17	P	Bifasica		
		432,4	7,8	7,722	11,380	5	18	P	Bifasica		
		510,0	9,4	9,306	13,223	5	13	P	Bifasica		
		380,4	15,5	15,345	19,081	15	14	P	Bifasica		
		395,6	9,8	9,702	13,661	10	13	P	Bifasica		
		396,4	8,5	8,415	12,204	10	12	P	Bifasica		
		398,4	12,3	12,177	16,216	12	11	P	Bifasica		
		412,6	13,2	13,068	17,065	15	10	P	Bifasica		
PROMEDIO		<b>395,6</b>	<b>10,9</b>	<b>10,6</b>	<b>13,9</b>	<b>8,9</b>	<b>11,7</b>				
DESVIACION STAND		<b>67,2</b>	<b>5,2</b>	<b>5,3</b>	<b>5,4</b>	<b>3,5</b>	<b>5,8</b>				
Th= TEMPERATURA DE HOMOGENIZACION											
Tm= Temperatura de fusión											
TmC= Temperatura de fusión corregida											
Tamaño= Tamaño de la inclusión											
Porcentaje= Es el porcentaje de fase vapor en la inclusión.											
P= Inclusiones primarias											
S= Inclusiones secundarias											



## **Anexo II**

## METODO ANALITICO U-Pb

Se separaron circones de las muestras de rocas por métodos convencionales, incluyendo: molienda, tamizado, segregación en líquidos pesados y separación magnética. Los cristales de circon fueron montados en un polímero epóxico y seccionados en aproximadamente su mitad y pulidos en el laboratorio de geocronología de la Universidad de Arizona. Los análisis fueron realizados por el Dr. Víctor Valencia y se analizaron circones individuales en secciones pulidas con un equipo de plasma masa con abrasión laser (LAM-ICPMS Micromass Isoprobe). El espectrómetro de masas es multi-colector con nueve colectores Faraday y cuatro canales para la cuenta de iones. Está equipado con un laser Excimer de ArF, el cual tiene una longitud de onda de emisión de 193 nm. Los análisis se realizaron en puntos de 50 micrones de diámetro con una energía de ~32 mJ y una razón de repetición de 10 Hz. Cada análisis consistió en la integración de 12 segundos en los picos sin disparar el laser y doce integraciones de 1 segundo en los picos con el laser disparado. La profundidad del agujero de ablación fue de ~15 micrones. El tiempo total por cada medida fue de ~90 segundos por análisis individual.

Los colectores fueron configurados de manera que se midiera el  $^{204}\text{Pb}$  en un canal de cuenta de iones, mientras el  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{238}\text{U}$  eran medidos simultáneamente con detectores Faraday. Todos los análisis se hicieron con el espectrómetro operando en modo estático. El fraccionamiento entre elementos se monitoreó analizando fragmentos del estándar SL-1, que es un cristal grande concordante de circon de Sri Lanka (SL-1) con una edad U-Pb conocida (ID-TIMS) de  $564 \pm 4 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ) (Geherls, datos inéditos). Las edades reportadas para los granos de circon están basadas en las razones  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , ya que los errores de las razones  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  y  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  son significativamente más altos. Esto se debe primariamente a la baja intensidad de la señal del  $^{207}\text{Pb}$  (usualmente  $<1 \text{ mV}$ ) de estos granos jóvenes y de bajo contenido de U. Las razones  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  fueron corregidas por su composición de Pb común (Stacey y Kramers, 1975) con una incerteza de 1.0 en el  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  común.

La media ponderada de los análisis individuales (~20 a 25 por cada muestra analizada) se calcularon de acuerdo a Ludwig (2001) para cada muestra. La edad tiene una incerteza adicional de la corrección de calibración, constante de decaimiento y Pb común (~3%). Esos errores sistemáticos se agregan cuadráticamente al error de medida de cada muestra. Las edades se reportan con error al nivel de 2 sigmas.

En cada muestra se analizaron los núcleos y los bordes de los circones para detectar la presencia de núcleos heredados más antiguos y/o bordes más nuevos (debidos a eventuales sobrecrecimientos de circón o pérdida de Pb). Afortunadamente no se observó diferencias significativas en ninguna de las muestras, lo que sugiere una historia simple de crecimiento de circones ígneos. Los valores relativamente bajos de U/Th para todos los análisis apoya lo anterior.

El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla II.1 y los respectivos datos analíticos en las Tabla II.2.

Tabla II.1.- Resumen de edades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  en circón.

Muestra de circón	Edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma $\pm 2\sigma$ )
KP-08 Pórfido Tricolor	108,5 $\pm$ 3,4
KP-13 Pórfido Dos Amigos	106,1 $\pm$ 3,5
KP-14 Pórfido Dos Amigos	104,0 $\pm$ 3,5
KP-20 Batolito Bandurrias	99,1 $\pm$ 1,9
KP-25 Batolito Bandurrias	99,6 $\pm$ 1,8

Tabla II.2.- Datos analíticos de dataciones LAM-ICP-MS en circones.

KP-08, Pórfido Tricolor (circón); 316912E/ 6795502N, h. 823 m

Muestra	U (ppm)	Th (ppm)	U/Th	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb (común)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	± (%)	Edad <sup>206</sup> Pb/ <sup>207</sup> Pb (Ma)	±(Ma)
1	153	138	1.1	463	0.016862	3.81	107.8	4.1
2	130	79	1.7	479	0.016587	5.21	106.1	5.5
3	57	30	1.9	251	0.016770	8.06	107.2	8.6
4	200	148	1.3	823	0.016644	1.76	106.4	1.9
5	150	91	1.6	559	0.017595	4.78	112.4	5.3
6	95	61	1.6	225	0.017085	6.78	109.2	7.3
7	156	95	1.6	567	0.017059	2.76	109.0	3.0
8	130	84	1.6	555	0.017014	2.92	108.8	3.1
9	194	188	1.0	473	0.016732	2.88	107.0	3.1
10	398	293	1.4	2455	0.016516	3.33	105.6	3.5
11	183	147	1.2	870	0.016721	3.24	106.9	3.4
12	165	197	0.8	465	0.017619	2.65	112.6	3.0
13	93	53	1.8	246	0.016901	4.97	108.0	5.3
14	193	156	1.2	189	0.016784	4.16	107.3	4.4
15	155	125	1.2	724	0.017414	4.50	111.3	5.0
16	143	139	1.0	722	0.017391	4.69	111.1	4.0
17	125	73	1.7	441	0.016932	5.23	108.2	5.2
18	103	72	1.4	513	0.017110	4.57	109.4	5.6
19	127	68	1.9	514	0.016711	3.76	106.8	4.0
20	96	53	1.8	372	0.016955	6.49	108.4	7.0
21	173	160	1.1	503	0.017199	4.36	109.9	4.8
22	76	41	1.9	476	0.017177	5.41	109.8	5.9
23	66	39	1.7	300	0.016268	7.46	104.0	7.7
24	68	41	1.6	215	0.016583	5.66	106.0	6.0
25	203	244	0.8	1336	0.017480	2.17	111.7	2.4
						<b>Promedio</b>	<b>108.5</b>	<b>3.4</b>

KP-13, Pórfido Dos Amigos (circón); 316864E/679203N, h. 730 m

Muestra	U (ppm)	Th (ppm)	U/Th	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb (común)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	± (%)	Edad <sup>206</sup> Pb/ <sup>207</sup> Pb (Ma)	±(Ma)
1	49	27	1.8	215	0.015989	6.30	102.3	6.4
2	194	239	0.8	541	0.017246	3.36	110.2	3.7
3	43	24	1.8	173	0.015760	7.94	100.8	7.9
4	78	62	1.3	285	0.017148	4.95	109.6	5.4
5	131	89	1.5	436	0.017008	3.78	108.7	4.1
6	48	24	2.0	159	0.015653	6.98	100.1	6.9
7	77	50	1.5	243	0.016120	5.60	103.1	5.7
8	62	38	1.6	158	0.016725	7.44	106.9	7.9
9	46	24	1.9	183	0.015861	8.05	101.4	8.1
10	37	19	1.9	248	0.016202	6.65	103.6	6.8
11	36	19	1.9	226	0.016185	7.11	103.5	7.3
12	48	28	1.7	240	0.017458	6.87	111.6	7.6
13	59	33	1.8	139	0.016360	5.11	104.6	5.3
14	120	112	1.1	526	0.017203	3.30	110.0	3.6
15	110	83	1.3	366	0.017023	6.32	108.8	6.8
16	83	65	1.3	384	0.017038	6.69	108.9	7.2
17	55	33	1.7	396	0.017388	7.83	111.1	8.6
18	168	112	1.5	620	0.016255	2.11	103.9	2.2
19	108	92	1.2	352	0.016908	3.25	108.1	3.5
20	65	40	1.6	159	0.016243	4.88	103.9	5.0
21	91	63	1.4	181	0.016287	7.48	104.1	7.7
22	60	27	2.2	254	0.016223	5.77	103.7	5.9
23	38	21	1.8	147	0.016734	7.82	107.0	8.3
24	51	32	1.6	166	0.016841	5.41	107.7	5.8
25	98	61	1.6	245	0.016272	4.06	104.1	4.2
						<b>Promedio</b>	<b>106.1</b>	<b>3.5</b>

KP-14 Pórfido Dos Amigos (circón); 316865E/ 6792232N, h. 730 m

Muestra	U (ppm)	Th (ppm)	U/Th	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (común)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	± (%)	Edad $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ (Ma)	±(Ma)
1	35	19	1.9	116	0.016125	8.20	103.1	8.4
2	44	28	1.5	165	0.016190	5.45	103.5	5.6
3	44	23	2.0	174	0.017475	6.62	111.7	7.3
4	32	18	1.8	157	0.016172	11.47	103.4	11.8
5	50	26	1.9	119	0.015598	10.27	99.8	10.2
6	32	17	1.9	131	0.015798	7.42	101.0	7.4
7	38	19	1.9	131	0.015520	4.94	99.3	4.9
8	39	19	2.1	181	0.016537	4.01	105.7	4.2
9	89	96	0.9	264	0.017083	3.69	109.2	4.0
10	92	69	1.3	377	0.015741	5.65	100.7	5.6
11	56	35	1.6	144	0.016187	7.85	103.5	8.1
12	35	23	1.5	149	0.015291	12.33	97.8	12.0
13	46	27	1.7	189	0.016480	9.91	105.4	10.3
14	56	36	1.6	191	0.015446	7.31	98.8	7.2
15	104	60	1.7	143	0.015249	5.22	97.6	5.0
16	100	97	1.0	274	0.016527	9.68	105.7	10.1
17	52	45	1.2	130	0.015205	7.41	97.3	7.1
18	43	26	1.6	132	0.016464	10.05	105.3	10.5
19	54	29	1.9	116	0.015395	5.81	98.5	5.7
20	34	21	1.6	89	0.015480	8.36	99.0	8.2
21	45	33	1.4	145	0.017240	7.57	110.2	8.3
22	284	494	0.6	1200	0.016438	1.62	105.1	1.7
23	42	22	1.9	119	0.016041	10.19	102.6	10.4
24	60	41	1.5	246	0.016877	4.91	107.9	5.2
						<b>Promedio</b>	<b>104.0</b>	<b>3.5</b>

KP-20 Diorita, Batolito Bandurrias (circón); 309969E/6777152N, h. 1288 m

Muestra	U (ppm)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	U/Th	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	± (%)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	± (%)	Corr. error	Edad <sup>206</sup> Pb/ <sup>207</sup> Pb (Ma)	±(Ma)	Edad <sup>206</sup> Pb/ <sup>207</sup> Pb (Ma)	±(Ma)
1	58	241	10.7	0.25740	24.7	0.01573	4.3	0.2	100.6	4.3	232.6	51.5
2	115	243	0.5	0.21358	9.1	0.01526	4.5	0.5	97.7	4.4	196.6	16.2
3	275	1045	1.3	0.12202	20.8	0.01545	1.6	0.1	98.8	1.6	116.9	22.9
4	190	1123	1.1	0.10910	11.5	0.01501	1.2	0.1	96.0	1.1	105.1	11.5
5	483	1186	1.1	0.13850	15.4	0.01572	1.5	0.1	110.6	1.5	131.7	19.0
6	696	2649	1.5	0.10619	7.4	0.01559	2.9	0.4	99.7	2.8	102.5	7.2
7	323	496	1.3	0.17405	20.6	0.01605	2.9	0.1	102.6	2.9	162.9	31.1
8	710	3275	0.6	0.10588	4.8	0.01584	2.6	0.5	101.3	2.6	102.2	4.6
9	147	238	1.4	0.22197	10.9	0.01471	4.6	0.4	94.1	4.3	203.5	20.1
10	213	683	1.1	0.13308	10.9	0.01597	2.2	0.2	102.1	2.2	126.9	13.0
11	319	1287	1.4	0.11259	15.7	0.01566	2.1	0.1	100.2	2.1	108.3	16.1
12	482	828	0.6	0.15365	10.0	0.01669	2.3	0.2	106.7	2.4	145.1	13.5
13	155	255	1.1	0.19830	8.0	0.01490	4.1	0.5	95.4	3.8	183.7	13.4
14	481	1561	1.0	0.11942	10.0	0.01568	1.4	0.1	100.3	1.4	114.5	10.9
15	835	3585	0.5	0.10651	5.8	0.01537	3.3	0.6	98.3	3.2	102.8	5.7
16	265	379	1.4	0.14641	7.8	0.01494	2.7	0.3	95.6	2.6	138.7	10.1
17	233	742	1.1	0.14244	11.4	0.01569	2.0	0.2	100.4	2.0	135.2	14.5
18	279	680	1.1	0.14252	8.5	0.01522	2.3	0.3	97.4	2.2	135.3	10.8
19	459	1733	0.4	0.11507	7.6	0.01590	1.5	0.2	101.7	1.5	110.6	8.0
20	125	227	2.4	0.19270	13.7	0.01531	5.6	0.4	97.9	5.5	178.9	22.5
21	282	1771	1.2	0.10622	9.6	0.01538	1.7	0.2	98.4	1.7	102.5	9.4
22	334	418	1.2	0.18441	20.8	0.01552	5.8	0.3	99.2	5.7	171.8	32.9
23	521	2081	1.3	0.10451	6.6	0.01538	3.6	0.5	98.4	3.5	100.9	6.3
24	578	2383	1.0	0.11630	12.0	0.01577	4.5	0.4	100.9	4.5	111.7	12.7
25	260	298	0.4	0.20918	8.6	0.01576	3.1	0.4	100.8	3.1	192.9	15.1
26	498	633	1.3	0.14961	7.9	0.01522	3.0	0.4	97.4	2.9	141.6	10.4
								<b>Promedio</b>	<b>99.1</b>	<b>1.9</b>		

KP-25 Granodiorita, Batolito Bandurrias (circón); 316395E/6795313N, h. 812 m

Muestra	U (ppm)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	U/Th	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	± (%)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	± (%)	Corr. error	Edad <sup>206</sup> Pb/ <sup>207</sup> Pb (Ma)	±(Ma)	Edad <sup>206</sup> Pb/ <sup>207</sup> Pb (Ma)	±(Ma)
1	394	2397	1.9	0.10240	9.1	0.01524	1.6	0.2	97.5	1.5	99.0	8.5
2	664	4737	1.5	0.10647	3.8	0.01604	1.5	0.4	102.6	1.5	102.7	3.7
3	837	752	1.5	0.16051	17.3	0.01644	4.0	0.2	105.1	4.2	151.1	24.3
4	572	489	7.2	0.19557	14.6	0.01614	5.0	0.3	103.2	5.2	181.4	24.3
5	1067	7260	4.1	0.10537	6.4	0.01561	3.8	0.6	99.8	3.7	101.7	6.2
6	992	2495	1.2	0.11145	4.8	0.01529	1.0	0.2	97.8	1.0	107.3	4.9
7	468	2800	1.2	0.10534	6.3	0.01537	2.3	0.4	98.3	2.3	101.7	6.1
8	586	1876	1.5	0.11919	6.8	0.01558	1.8	0.3	99.7	1.8	114.3	7.4
9	740	5495	1.2	0.10405	5.0	0.01596	2.7	0.5	102.1	2.7	100.5	4.8
10	499	3401	1.3	0.10441	5.7	0.01634	2.7	0.5	104.5	2.8	100.8	5.5
11	864	5326	1.2	0.10647	2.1	0.01551	1.0	0.5	99.2	1.0	102.7	2.1
12	511	3116	1.3	0.10426	8.9	0.01574	2.1	0.2	100.6	2.1	100.7	8.5
13	885	5912	3.3	0.10224	4.8	0.01532	3.4	0.7	98.0	3.3	98.8	4.6
14	845	6108	2.6	0.10678	4.5	0.01621	3.0	0.7	103.7	3.1	103.0	4.4
15	1111	5261	1.4	0.10867	5.7	0.01592	3.6	0.6	101.8	3.6	104.7	5.7
16	959	4836	0.9	0.09711	4.8	0.01531	4.2	0.9	97.9	4.1	94.1	4.3
17	675	3745	1.2	0.10244	7.8	0.01559	3.4	0.4	99.7	3.4	99.0	7.4
18	1094	7101	6.1	0.10572	2.9	0.01538	1.1	0.4	98.4	1.1	102.0	2.8
19	604	4281	1.9	0.10672	6.0	0.01546	2.6	0.4	98.9	2.6	103.0	5.9
20	631	3607	3.0	0.10427	6.7	0.01528	2.0	0.3	97.8	1.9	100.7	6.4
21	596	3262	1.4	0.11378	5.0	0.01548	2.0	0.4	99.0	2.0	109.4	5.1
22	820	4246	1.1	0.09995	6.2	0.01531	3.4	0.5	97.9	3.3	96.7	5.7
23	1362	10517	5.7	0.10937	2.1	0.01580	1.0	0.5	101.1	1.0	105.4	2.1
24	1214	1365	3.5	0.13266	12.5	0.01538	1.6	0.1	98.4	1.6	126.5	14.9
25	605	4146	1.4	0.10578	6.5	0.01584	1.0	0.2	101.3	1.0	102.1	6.3
26	940	2268	1.0	0.11238	7.1	0.01549	1.0	0.1	99.1	1.0	108.1	7.3
								<b>Promedio</b>	<b>99.6</b>	<b>1.8</b>		



## **Dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$**

Micas de alteración hidrotermal de Dos Amigos y Tricolor (biotita y sericita) fueron datadas por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  con extracción por pasos y también biotita primaria magmática de muestras del Batolito Bandurrias. El trabajo analítico se realizó en el laboratorio de geocronología de la Universidad de Stanford bajo la supervisión del Dr. Michael McWilliams. El laboratorio de Stanford está equipado con un espectrómetro de alta sensibilidad para gases nobles MAP 216 con una línea de extracción y purificación de argón con blanco muy bajo, la que está conectada a un horno con resistencia eléctrica. Las muestras de micas ricas en K de 1 a 2 mg fueron envueltas individualmente en láminas de Al de alta pureza y empacadas en tubos de cuarzo para su irradiación en un reactor nuclear. Se intercalaron entre las muestras paquetes conteniendo algunos miligramos de sanidina estándar (muestra 85G003) de la riolita Taylor Creek, de Nuevo Mexico de 27.92 Ma (Duffield y Dalrymple, 1990). La posición de cada paquete en los tubos fue cuidadosamente medida antes y después de la irradiación por neutrones en un reactor nuclear.

La degasificación se hizo incrementando progresivamente la temperatura de las muestras por pasos, para cada incremento en la temperatura, el gas liberado fue purificado por purificadores de Zr-V-Fe caliente y Zr-Al frío por 5 a 10 minutos y luego transferido por expansión en el espectrómetro de masas para su análisis.

El espectrómetro de masas de alta sensibilidad emplea una fuente de iones Bauer-Signer y un multiplicador de iones para lograr una sensibilidad para argón de unos  $2 \times 10^{-14}$  moles/nA de señal. Las razones isotópicas pueden medirse con este equipo al  $\pm 0,1\%$  ( $1\sigma$ ). El background en el espectrómetro de masas operado en modo estático es típicamente de  $4 \times 10^{-19}$  moles para razones de masas entre 36 al 39 y de  $6 \times 10^{-17}$  moles para razones de masa incluyendo la 40.

Las razones isotópicas medidas fueron corregidas por el Ar generado en el reactor a partir de K, Ca, y Cl, por el decaimiento radioactivo del  $^{37}\text{Ar}$  y  $^{39}\text{Ar}$ , los blancos de la línea de extracción y la discriminación de masas del espectrómetro.

Se usaron las constantes de decaimiento y abundancias naturales de elementos recomendadas por Steiger y Jager (1977) para los cálculos de las edades. La reducción final de los datos con extracción por pasos en isócronas y espectros de edades se hizo usando un programa computacional EyeSoreCon de Bradley Hacker de la Universidad de Stanford, el cual usa las ecuaciones de McIntyre et al. (1966) y Cork (1969) para la regresión de los datos correlacionados y el cálculo de la media ponderada cuadrática de las desviaciones (MSWD) de la estadística de ajuste. La calidad del espectro de edades y la presencia de plateau se hizo en base al criterio de Lanphere y Dalrymple (1978).

Tabla II.3. Resumen de dataciones por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Muestra	Edad (Ma)	Tipo	Edad isócrona (Ma)	Ubicación
KP-09 biotita	105.4 ± 3.3	Media ponderada	111 ± 28	Milonita Tricolor
KP-12 biotita	104.1 ± 1.9	Media Ponderada	102.3 ± 9.7	Tricolor; gradiente 97 – 105 Ma
KP-10 sericita	96.3 ± 3.7	Plateau	97.8 ± 1.2	Tricolor
KP-10 biotita	97.1 ± 0.9	Media Ponderada	97.4 ± 1.1	Tricolor; gradiente 95 – 99 Ma
KP-16 sericita	96.1 ± 1.0	Plateau	96.2 ± 0.5	Dos Amigos
KP-13 biotita	96.0 ± 0.7	Media ponderada	96.3 ± 1.5	Dos Amigos; perturbado
KP-14 biotita	89.1 ± 2.0	Media ponderada	89.4 ± 2.3	Dos Amigos; perturbado
KP-16 sericita	96.1 ± 1.0	Plateau	96.2 ± 0.5	Dos Amigos
KP-25 biotita	96.9 ± 0.9	Media ponderada	95.2 ± 1.3	Batolito Bandurrias
KP-20 biotita	94.8 ± 1.0	Media ponderada	94.5 ± 0.8	Batolito Bandurrias

**Tabla II.4.- Datos analíticos de dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$**

**Biotita KP-10, Pórfido Tricolor**

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	$\Delta J$	% $\Delta J$	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age ( $\pm 1s$ )	
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	295,5	0,001814	0,0000098	0,5%	1,0000	5,21E-13	95,96	0,08

T°C	$^{40}/^{39} \pm 1s$		$^{39}/^{40} \pm 1s$		$^{36}/^{40} \pm 1s$		39	Age (no J error)	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	K/Ca	$\Delta$ K/Ca	Total Gas	$\Delta$ Total Gas	
700	21,20694	0,74634	0,01917	0,00017	0,0020086	0,000039	0,004373	68,11	7,06	40,6%	3,2029	0,24922141	0,566258	0,01993
800	28,86720	0,10928	0,02979	0,00005	0,0004737	0,000010	0,007145	92,09	1,02	85,9%	9,6445	1,37224172	1,259334	0,00477
850	29,85220	0,05416	0,03226	0,00003	0,0001249	0,000005	0,014267	95,15	0,50	96,2%	25,8826	4,96036955	2,600299	0,00472
900	30,18483	0,06239	0,03227	0,00004	0,0000879	0,000006	0,013748	96,18	0,58	97,3%	25,9070	5,11449165	2,533677	0,00524
950	30,30883	0,07533	0,03212	0,00004	0,0000900	0,000007	0,010244	96,57	0,70	97,2%	22,6066	5,21391245	1,895722	0,00471
1000	30,68577	0,07899	0,03225	0,00004	0,0000353	0,000007	0,009947	97,74	0,73	98,9%	24,3905	6,28397114	1,863518	0,00480
1050	31,30342	0,05174	0,03137	0,00002	0,0000613	0,000005	0,016418	99,65	0,48	98,1%	26,0757	4,38375532	3,137944	0,00519
1100	30,72059	0,02804	0,03228	0,00002	0,0000283	0,000002	0,032006	97,85	0,26	99,1%	40,6536	5,41314864	6,00319	0,00548
1150	30,36788	0,02470	0,03256	0,00002	0,0000380	0,000002	0,036641	96,75	0,23	98,8%	51,8351	7,76648557	6,793752	0,00553
1200	30,12964	0,05158	0,03274	0,00003	0,0000461	0,000005	0,016791	96,01	0,48	98,5%	31,9697	6,38335043	3,088781	0,00529
1300	28,72927	0,42741	0,03146	0,00021	0,0003255	0,000040	0,002088	91,66	3,99	90,3%	5,3648	1,45434258	0,366328	0,00545
1400	5,52780	8,81054	0,01254	0,00070	0,0031495	0,000349	0,000117	18,00	85,65	6,6%	0,2668	0,06465976	0,003953	0,00630

KP-10 Sericita, Pórfido Tricolor

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	ΔJ	%ΔJ	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age (±1s)	
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	295,5	0,001811	0,0000098	0,5%	1,0000	5,21E-13	93,58	1,08

T°C	40*/39 ±1s		39/40 ±1s		36/40 ±1s		39	Age (no J error)		40Ar* (%)	K/Ca	Δ K/Ca	Total Gas	Δ Total Gas
700	18,86766	2,93590	0,01949	0,00053	0,0021400	0,000178	0,000208	60,62	27,83	36,5%	0,5012	0,1145588	0,421073	0,06552
800	21,06851	3,26045	0,02600	0,00094	0,0015305	0,000264	0,000197	67,56	30,79	54,6%	1,0357	0,51180889	0,444994	0,06886
850	23,62322	2,58673	0,03033	0,00099	0,0009594	0,000243	0,000268	75,59	24,32	71,5%	2,8434	2,82278834	0,679271	0,07438
900	29,63530	1,29873	0,03028	0,00054	0,0003472	0,000119	0,000519	94,33	12,08	89,6%	4,1442	3,13101874	1,651079	0,07236
950	29,44958	0,36127	0,03224	0,00017	0,0001706	0,000035	0,002031	93,75	3,36	94,8%	8,4603	3,28314157	6,414374	0,07869
1000	30,08253	0,49316	0,03232	0,00025	0,0000940	0,000047	0,001290	95,72	4,58	97,1%	19,2457	26,5822139	4,162919	0,06824
1025	30,10582	1,02160	0,03326	0,00053	-0,0000041	0,000112	0,000634	95,79	9,50	100,0%	9,8862	14,1590055	2,047598	0,06948
1050	32,75958	1,42172	0,03380	0,00081	-0,0003630	0,000142	0,000430	103,99	13,16	110,6%	4,0199	3,47477547	1,512664	0,06565
1075	29,09906	1,22212	0,03221	0,00059	0,0002119	0,000117	0,000542	92,67	11,38	93,6%	2,5624	1,12353089	1,692053	0,07106
1125	31,46007	0,32618	0,03230	0,00017	-0,0000552	0,000031	0,001931	99,98	3,03	101,5%	27,8701	37,3543759	6,51555	0,06755
1175	30,01839	0,58478	0,03233	0,00030	0,0001000	0,000055	0,001120	95,52	5,44	96,9%	9,5110	7,51070186	3,607341	0,07027
1225	21,40458	8,31494	0,03927	0,00606	0,0005397	0,000963	0,000082	68,62	78,47	83,5%	0,5381	0,33160536	0,187615	0,07288
1275	9,74252	18,80665	0,04261	0,01640	0,0019792	0,002473	0,000036	31,56	181,17	40,2%	0,2275	0,13342949	0,038126	0,07360
1350	-45,63196	38,96507	0,04024	0,03005	0,0095985	0,008408	0,000019	-155,64	416,40	-186,0%	0,1079	0,05986019	0,01	0,07828
1400	-50,24208	49,70293	0,02869	0,02004	0,0082621	0,006970	0,000015	-172,13	536,03	-146,0%	0,0990		0,01	0,07962

**Biotita KP-14, Pórfido Dos Amigos**

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	ΔJ	%ΔJ	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age (±1s)
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	295,5	0,001842	0,00001	0,5%	1,0000	5,21E-13	86,53 0,26

T°C	40*/39 ±1s		39/40 ±1s		36/40 ±1s		39	Age (no J error)		40Ar* (%)	K/Ca	Δ K/Ca	Total Gas	Δ Total Gas
600	8,59867	13,29741	0,01632	0,00310	0,0029092	0,000501	0,007902	28,36	130,53	13,9%	1,0827	0,15636393	0,136565	0,21119
700	-4,79702	0,47366	0,03519	0,00039	0,0039554	0,000055	0,007007	-16,02	4,77	-17,3%	0,5700	0,00761626	0,001	0,00667
800	23,76668	0,08719	0,03042	0,00005	0,0009371	0,000007	0,022031	77,32	0,83	72,2%	3,1489	0,05603468	1,052413	0,00386
850	27,06316	0,11493	0,03341	0,00008	0,0003240	0,000010	0,048913	87,78	1,09	90,3%	14,8510	0,67386495	2,66068	0,01130
900	27,39593	0,01891	0,03574	0,00002	0,0000706	0,000002	0,064784	88,84	0,18	97,8%	30,9307	1,56572407	3,567298	0,00246
950	27,03559	0,03579	0,03622	0,00003	0,0000707	0,000003	0,033184	87,70	0,34	97,8%	18,4259	1,11661788	1,803237	0,00239
1000	28,26827	0,05394	0,03456	0,00004	0,0000776	0,000005	0,023842	91,59	0,51	97,6%	14,8385	0,99959957	1,354673	0,00258
1050	28,22997	0,05134	0,03473	0,00003	0,0000659	0,000005	0,022057	91,47	0,49	97,9%	16,2075	1,28254529	1,251555	0,00228
1100	28,63182	0,02787	0,03446	0,00002	0,0000451	0,000003	0,042590	92,74	0,26	98,6%	30,0261	2,31725612	2,450986	0,00239
1150	28,03796	0,01445	0,03541	0,00002	0,0000240	0,000001	0,141687	90,87	0,14	99,2%	103,6677	8,59539388	7,984807	0,00412
1200	26,50497	0,01855	0,03731	0,00002	0,0000376	0,000002	0,076831	86,01	0,18	98,8%	48,9932	3,4793084	4,093087	0,00286
1300	24,17572	0,22134	0,03974	0,00020	0,0001325	0,000024	0,006184	78,62	2,11	95,9%	6,1739	0,67537349	0,300513	0,00275
1400	11,98174	3,05631	0,03706	0,00252	0,0018814	0,000330	0,000510	39,39	29,82	43,9%	0,6136	0,08191808	0,012288	0,00313

Biotita KP-13, Pórfido Dos Amigos

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	ΔJ	%ΔJ	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age (±1s)
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	295,5	0,001822	0,0000099	0,5%	1,0000	5,21E-13	96,01 0,08

T°C	40*/39 ±1s	39/40 ±1s	36/40 ±1s	39	Age (no J error)	40Ar* (%)	K/Ca	Δ K/Ca	Total Gas	Δ Total Gas				
700	16,47401	0,68710	0,02409	0,00025	0,0020410	0,000047	0,002067	53,34	6,58	39,5%	1,3401	0,10311525	0,20172	0,00841
800	24,70826	0,23608	0,03252	0,00014	0,0006645	0,000021	0,004904	79,42	2,23	80,2%	6,0397	0,87110029	0,717909	0,00686
850	30,84954	0,15417	0,03084	0,00011	0,0001648	0,000011	0,008653	98,63	1,44	95,0%	20,1553	5,48818117	1,581456	0,00790
900	29,99098	0,06922	0,03269	0,00004	0,0000659	0,000006	0,016340	95,96	0,65	98,0%	42,9635	13,178149	2,903214	0,00670
950	30,25209	0,07647	0,03283	0,00004	0,0000235	0,000007	0,013051	96,78	0,71	99,2%	39,0897	13,7259427	2,339067	0,00591
1000	30,41638	0,09530	0,03269	0,00005	0,0000194	0,000009	0,010527	97,29	0,89	99,3%	46,1024	23,7349041	1,896968	0,00594
1050	30,81957	0,09382	0,03224	0,00005	0,0000217	0,000009	0,010671	98,54	0,88	99,3%	40,3694	17,8786463	1,948324	0,00593
1100	30,99294	0,05125	0,03210	0,00003	0,0000175	0,000005	0,020036	99,08	0,48	99,4%	69,1995	28,0269426	3,678786	0,00608
1150	30,21787	0,02710	0,03295	0,00002	0,0000150	0,000002	0,039492	96,67	0,25	99,5%	137,0630	55,9664224	7,06987	0,00634
1200	30,14549	0,03251	0,03313	0,00002	0,0000042	0,000003	0,035847	96,44	0,30	99,8%	269,1624	238,272185	6,401957	0,00690
1300	30,07516	0,14995	0,03312	0,00009	0,0000131	0,000014	0,007050	96,22	1,40	99,5%	54,0845	49,0474176	1,256059	0,00626
1400	12,34614	7,12022	0,03308	0,00399	0,0020020	0,000720	0,000158	40,12	68,65	40,7%	1,8809	2,63326026	0,011569	0,00667

**Biotita KP-12, Pórfido Tricolor**

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	ΔJ	%ΔJ	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age (±1s)	
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	295,5	0,001825	0,0000099	0,5%	1,0000	5,21E-13	85,17	0,68

T°C	40*/39 ±1s		39/40 ±1s		36/40 ±1s		39	Age (no J error)	40Ar* (%)	K/Ca	Δ K/Ca	Total Gas	Δ Total Gas	
600	-16,04812	38,35375	-0,00500	0,00060	0,0031127	0,000611	0,002869	-53,63	390,26	8,2%	0,2374	0,02354644	0,001	0,50564
700	-2,00067	0,25806	0,04769	0,00043	0,0037070	0,000039	0,011290	-6,60	2,56	-9,9%	0,7892	0,00857744	0,001	0,01339
800	11,06232	0,11170	0,04348	0,00014	0,0017564	0,000013	0,024242	36,06	1,08	47,9%	1,7409	0,01867803	1,232377	0,01244
850	25,17020	0,53642	0,02922	0,00020	0,0008948	0,000048	0,029399	81,02	5,07	73,5%	8,6486	0,27366091	3,40066	0,07247
900	30,44761	0,09096	0,02874	0,00005	0,0004228	0,000007	0,037604	97,56	0,85	87,4%	12,1834	0,45902086	5,26174	0,01572
950	31,85018	0,13448	0,02704	0,00006	0,0004692	0,000010	0,019297	101,93	1,26	86,0%	8,0082	0,3416231	2,824432	0,01193
1000	32,05995	0,09392	0,02720	0,00004	0,0004327	0,000007	0,020908	102,58	0,88	87,1%	10,5272	0,56849686	3,08037	0,00902
1050	32,75946	0,17438	0,02667	0,00008	0,0004270	0,000011	0,012266	104,76	1,63	87,3%	9,5245	0,77241427	1,846641	0,00983
1100	33,06499	0,04087	0,02760	0,00002	0,0002959	0,000003	0,030602	105,71	0,38	91,2%	17,4397	1,03745845	4,650012	0,00575
1150	32,21137	0,04054	0,02915	0,00002	0,0002063	0,000003	0,025504	103,05	0,38	93,8%	17,2864	1,20992131	3,775331	0,00475
1200	27,82782	0,54827	0,02869	0,00021	0,0006820	0,000047	0,002450	89,37	5,15	79,7%	1,8655	0,16726075	0,313306	0,00617
1300	20,22589	1,12199	0,03001	0,00052	0,0013300	0,000100	0,000977	65,39	10,69	60,4%	0,8127	0,06985235	0,090774	0,00504
1400	-9,70827	5,94590	0,01874	0,00118	0,0039998	0,000378	0,000194	-32,25	59,79	-18,9%	0,1842	0,01891899	0,01	0,00531

**Biotita KP-09, Milonita Tricolor**

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	%ΔJ	ΔJ	J-adj
<b>287,9</b>	0,006608	1,026398	1,019803	1,006603	5,54E-04	<b>295,5</b>	0,0018128	0,0000098	0,5%	1,0000

Date	Time	T°C	40*/39	39/40	36/40	39	t (no J error)				
15-Feb-06	2:59 PM	700	12,45769	0,13410	0,02694	0,00005	0,0022484	0,000011	7,487E-12	40,29	1,29
15-Feb-06	4:04 PM	800	28,96501	0,18338	0,02705	0,00007	0,0007324	0,000013	4,930E-12	92,32	1,71
15-Feb-06	5:03 PM	850	31,84291	0,42981	0,02527	0,00015	0,0006612	0,000026	2,000E-12	101,25	3,99
15-Feb-06	6:03 PM	900	32,77460	0,40406	0,02474	0,00014	0,0006402	0,000024	2,294E-12	104,12	3,74
15-Feb-06	6:57 PM	950	32,30486	0,56993	0,02398	0,00019	0,0007622	0,000033	1,603E-12	102,67	5,28
15-Feb-06	7:51 PM	1000	34,66696	0,40866	0,02425	0,00014	0,0005397	0,000024	2,529E-12	109,96	3,77
15-Feb-06	8:46 PM	1050	33,79652	0,43496	0,02591	0,00017	0,0004204	0,000027	2,865E-12	107,28	4,02
15-Feb-06	9:41 PM	1100	29,96173	4,81906	-0,27938	0,24274	0,0317100	0,027884	3,052E-13	95,42	44,85
15-Feb-06	10:35 PM	1125	40,55259	6,69593	-0,02896	0,00357	0,0073585	0,001067	2,486E-13	127,98	61,20
15-Feb-06	11:30 PM	1150	-47,18991	7,80776	0,00304	0,00005	0,0038698	0,000072	2,884E-13	-161,33	83,77



Sericita KP-16, Dos Amigos

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	ΔJ	%ΔJ	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age (±1σ)
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	262	0,001802	0,0000098	0,5%	1,0000	5,21E-13	96,48 0,07

T°C	40*/39 ±1s	39/40 ±1s	36/40 ±1s	39	Age (no J error)	40Ar* (%)	K/Ca	Δ K/Ca	Total Gas	Δ Total Gas				
700	29,73786	0,40693	0,01030	0,00002	0,0026480	0,000012	0,003895	94,15	3,77	30,6%	1,2438	0,04059818	0,596148	0,00816
800	32,78763	0,11891	0,02759	0,00005	0,0003644	0,000009	0,005820	103,54	1,09	90,3%	4,9873	0,38204536	0,982189	0,00356
850	31,85607	0,40953	0,02813	0,00014	0,0003966	0,000035	0,005981	100,68	3,78	89,5%	6,8752	0,69723426	0,980565	0,01261
900	31,21100	0,05797	0,03048	0,00003	0,0001857	0,000005	0,010932	98,69	0,54	95,0%	15,5049	1,94629561	1,7561	0,00326
950	30,36276	0,01595	0,03258	0,00001	0,0000416	0,000001	0,063732	96,08	0,15	98,8%	74,0919	8,07083447	9,959245	0,00523
1000	30,37165	0,01986	0,03271	0,00002	0,0000252	0,000002	0,038970	96,11	0,18	99,2%	51,1837	6,14379093	6,091463	0,00398
1033	30,31887	0,05428	0,03250	0,00003	0,0000559	0,000005	0,013562	95,95	0,50	98,4%	21,8216	3,16111675	2,116263	0,00379
1066	30,34331	0,10413	0,03215	0,00006	0,0000934	0,000009	0,006389	96,02	0,96	97,4%	11,8716	1,99651325	0,997757	0,00342
1100	30,15941	0,14270	0,03222	0,00007	0,0001083	0,000014	0,004861	95,45	1,32	97,0%	8,8991	1,49302037	0,754597	0,00357
1133	30,33206	0,08385	0,03227	0,00005	0,0000807	0,000007	0,008500	95,99	0,78	97,8%	13,7739	2,02665992	1,326881	0,00367
1166	30,35387	0,03571	0,03276	0,00002	0,0000218	0,000003	0,018524	96,05	0,33	99,3%	33,5631	5,56732083	2,893766	0,00340
1200	30,37540	0,05477	0,03265	0,00003	0,0000315	0,000005	0,012743	96,12	0,51	99,1%	22,3387	3,5885767	1,992208	0,00359
1250	22,18722	2,22048	0,03199	0,00102	0,0011081	0,000216	0,000303	70,71	20,82	70,5%	0,5059	0,07951582	0,034572	0,00346
1300	3,87129	11,13935	0,03057	0,00476	0,0033651	0,001141	0,000061	12,54	107,86	10,4%	0,1329	0,02758866	0,00121	0,00348
1300	-45,30712	26,18285	0,02351	0,00646	0,0078831	0,002786	0,000027	-153,62	277,99	-109,3%	0,0505		0,01	0,00363

Sericita KP-26, Tricolor

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	%ΔJ	ΔJ	J-adj
287,9	0,006608	1,026398	1,019803	1,006603	5,54E-04	295,5	0,00181	0,0000098	0,5%	1,0000

Date	Time	T°C	40*/39	39/40	36/40	39	t (no J error)				
16-Feb-06	10:52 AM	700	21,21125	0,70783	0,01387	0,00007	0,0023886	0,000027	1,427E-12	67,97	6,68
16-Feb-06	11:39 AM	800	20,60073	0,32997	0,01346	0,00003	0,0024456	0,000012	2,904E-12	66,05	3,12
16-Feb-06	12:26 PM	900	26,98967	0,10296	0,02125	0,00003	0,0014431	0,000005	1,091E-11	86,05	0,96
16-Feb-06	1:13 PM	1000	26,07326	0,28833	0,01610	0,00004	0,0019635	0,000012	3,623E-12	83,19	2,70
16-Feb-06	2:00 PM	1050	26,68796	1,13663	0,01178	0,00009	0,0023206	0,000038	1,236E-12	85,11	10,62
16-Feb-06	2:47 PM	1100	28,70882	0,83375	0,01826	0,00016	0,0016105	0,000043	2,428E-12	91,39	7,76
16-Feb-06	3:34 PM	1150	31,45076	1,25049	0,01930	0,00028	0,0013296	0,000067	2,333E-12	99,88	11,59
16-Feb-06	4:22 PM	1200	92,29184	15,38270	0,01970	0,00370	-0,0027693	0,001061	2,758E-13	278,69	129,12
16-Feb-06	5:09 PM	1250	412,59964	78,88143	-0,00398	0,00085	0,0089387	0,002129	7,976E-14	1006,29	442,37
16-Feb-06	5:56 PM	1300	384,39289	117,58528	0,00191	0,00034	0,0008982	0,000676	7,044E-14	952,78	679,28
16-Feb-06	6:43 PM	1400	-895,68180	714,31232	0,00016	0,00001	0,0038616	0,000113	8,914E-14	#jNUM!	11264,78

Biotita KP<sup>-</sup>-20, Batolito Bandurrias

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	ΔJ	%ΔJ	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age (±1s)	
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	366	0,001833	0,0000099	0,5%	1,0000	5,21E-13	91,41	0,07

T°C	40*/39 ±1s		39/40 ±1s		36/40 ±1s		39	Age (no J error)		40Ar* (%)	K/Ca	Δ K/Ca	Total Gas	Δ Total Gas
600	-283,81355	13,84701	-0,01210	0,00134	-0,0066518	0,000632	0,001251	-1325,32	286,42	343,9%	0,2996	0,05178678	0,001	0,02663
700	-10,83976	0,58388	0,03079	0,00047	0,0036443	0,000061	0,009698	-36,21	5,91	-33,6%	0,9024	0,01621126	0,001	0,00870
800	11,51584	0,22423	0,02571	0,00011	0,0019233	0,000015	0,010086	37,69	2,18	29,4%	1,3834	0,01882164	0,178547	0,00348
850	25,09176	0,05585	0,02922	0,00002	0,0007288	0,000005	0,022075	81,14	0,53	73,2%	5,4286	0,12593235	0,851454	0,00190
900	28,33737	0,03049	0,03120	0,00002	0,0003164	0,000002	0,039891	91,37	0,29	88,3%	10,7099	0,27352423	1,737679	0,00187
950	29,18633	0,02461	0,03186	0,00001	0,0001920	0,000002	0,041241	94,04	0,23	92,9%	13,0053	0,39033486	1,850323	0,00156
1000	29,37968	0,03135	0,03208	0,00002	0,0001571	0,000002	0,041938	94,64	0,30	94,1%	14,6932	0,47878729	1,894074	0,00202
1050	29,24078	0,02715	0,03109	0,00001	0,0002488	0,000002	0,055234	94,21	0,26	90,8%	13,9388	0,34425161	2,482747	0,00231
1100	29,55570	0,02174	0,03201	0,00001	0,0001474	0,000002	0,078782	95,20	0,20	94,5%	15,4622	0,2926374	3,57937	0,00263
1150	29,33178	0,01676	0,03333	0,00002	0,0000608	0,000001	0,154472	94,49	0,16	97,7%	20,0389	0,25064129	6,965115	0,00398
1200	29,31091	0,01601	0,03376	0,00002	0,0000283	0,000001	0,182524	94,43	0,15	98,9%	32,7317	0,59444783	8,22409	0,00449
1300	29,22713	0,13840	0,03206	0,00009	0,0001724	0,000012	0,012774	94,17	1,30	93,6%	6,2926	0,29435254	0,57392	0,00272
1400	-10,37456	3,80005	0,01731	0,00069	0,0032229	0,000215	0,000555	-34,64	38,44	-18,2%	0,5234	0,04725575	0,01	0,00324

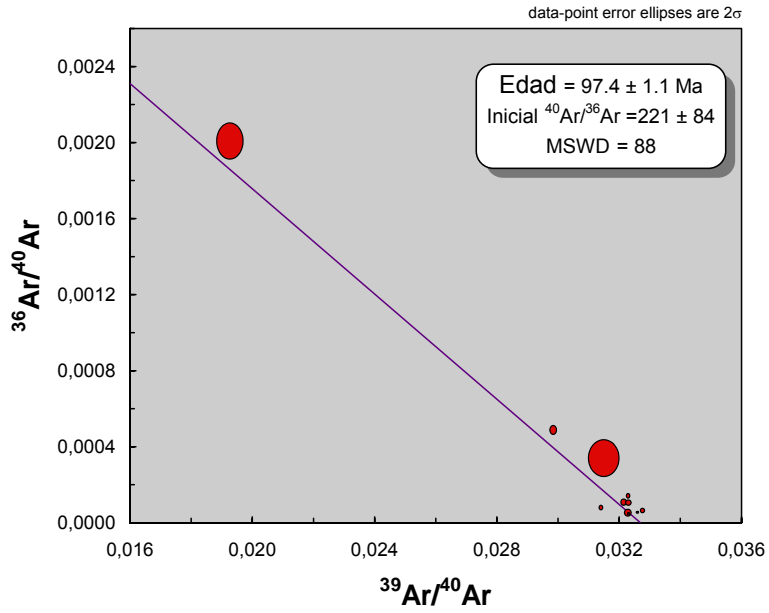
**Biotita KP-25, Batolito Bandurrias**

Discrim	Factor	40 Factor	39 Factor	37 Factor	lambda	40/36	J	ΔJ	%ΔJ	J-adj	Sensitivity	Total Gas Age (±1s)	
286	0,008315	1,033217	1,024918	1,008309	5,54E-04	295,5	0,001838	0,00001	0,5%	1,0000	5,21E-13	94,10	0,05

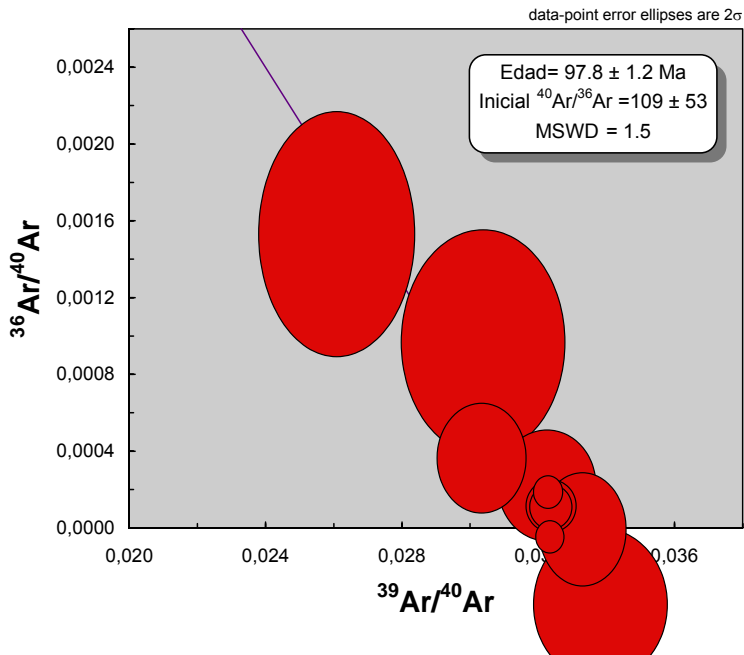
T°C	40*/39 ±1s		39/40 ±1s		36/40 ±1s		39	Age (no J error)		40Ar* (%)	K/Ca	Δ K/Ca	Total Gas	Δ Total Gas
600	-6,23897	1,14955	0,01905	0,00033	0,0037862	0,000061	0,003464	-20,81	11,57	-12,1%	0,7256	0,01999496	0,001	0,00687
700	2,14105	0,34114	0,02986	0,00023	0,0031678	0,000031	0,008072	7,09	3,38	6,2%	0,9989	0,01703973	0,029825	0,00475
800	17,32255	0,12875	0,02914	0,00006	0,0016760	0,000011	0,012243	56,55	1,24	50,3%	1,9574	0,02418385	0,365985	0,00272
850	26,36667	0,05691	0,03044	0,00003	0,0006680	0,000005	0,019034	85,39	0,54	80,1%	4,8880	0,0933958	0,866063	0,00187
900	30,37485	0,09459	0,03074	0,00009	0,0002239	0,000002	0,039531	98,02	0,89	93,3%	11,0868	0,52147891	2,072152	0,00645
950	29,70855	0,02721	0,03189	0,00002	0,0001782	0,000002	0,048683	95,93	0,26	94,6%	14,1242	0,30673501	2,495913	0,00229
1000	30,19117	0,02406	0,03195	0,00002	0,0001202	0,000002	0,047082	97,44	0,23	96,3%	16,8193	0,44125347	2,453019	0,00195
1050	30,64907	0,03564	0,03086	0,00003	0,0001832	0,000002	0,054248	98,88	0,34	94,5%	13,5478	0,24196955	2,869245	0,00334
1100	30,68925	0,03743	0,03110	0,00003	0,0001545	0,000002	0,069050	99,01	0,35	95,3%	12,1464	0,16754612	3,656974	0,00446
1150	29,99298	0,02069	0,03273	0,00002	0,0000625	0,000001	0,156321	96,82	0,20	98,0%	23,0358	0,27401139	8,091075	0,00558
1200	29,73055	0,01817	0,03313	0,00002	0,0000510	0,000001	0,110704	95,99	0,17	98,4%	26,4672	0,48065426	5,679839	0,00347
1300	29,51437	0,11037	0,03220	0,00007	0,0001684	0,000009	0,010601	95,31	1,04	94,9%	7,2364	0,36103913	0,539965	0,00202
1400	8,49438	2,95598	0,01888	0,00066	0,0028414	0,000172	0,000436	27,95	28,96	15,7%	0,3569	0,02185473	0,006393	0,00222

**ISOCRONAS INVERSAS DE CORRELACIÓN DE  
ISOTOPOS DE Ar DE MUESTRAS DE LA ZONA  
DE DOMEYKO**

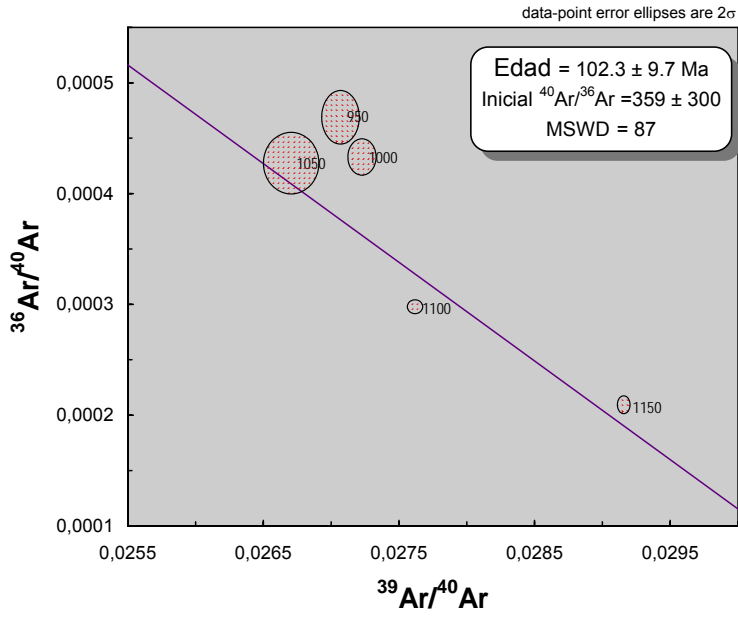
### BIOTITA TRICOLOR- KP10



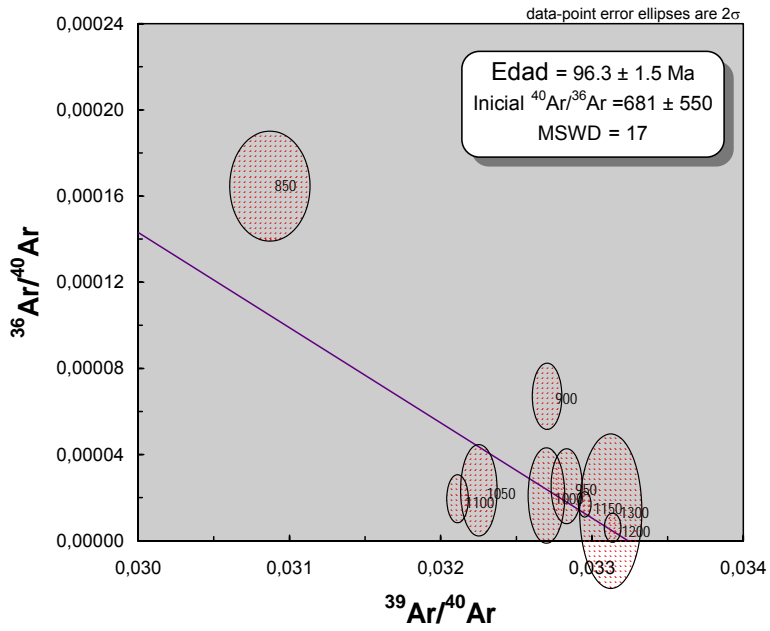
### MUSCOVITA TRICOLOR KP-10



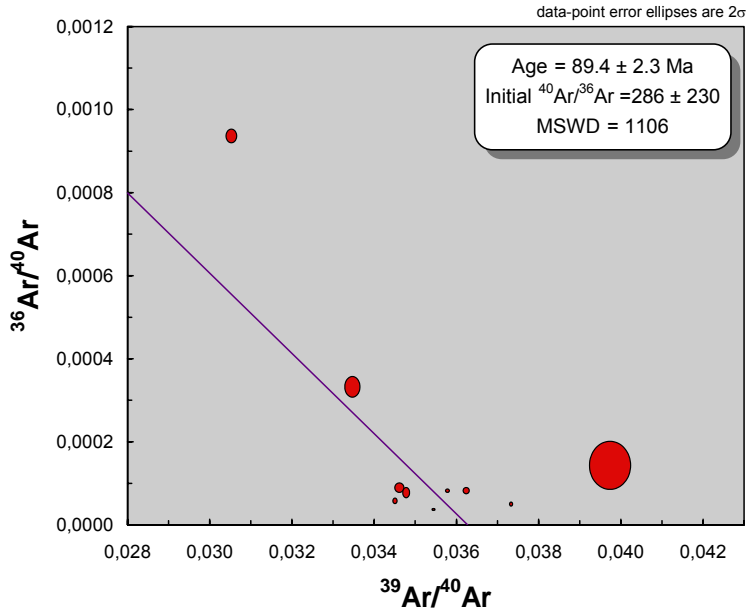
### BIOTITA TRICOLOR KP-12



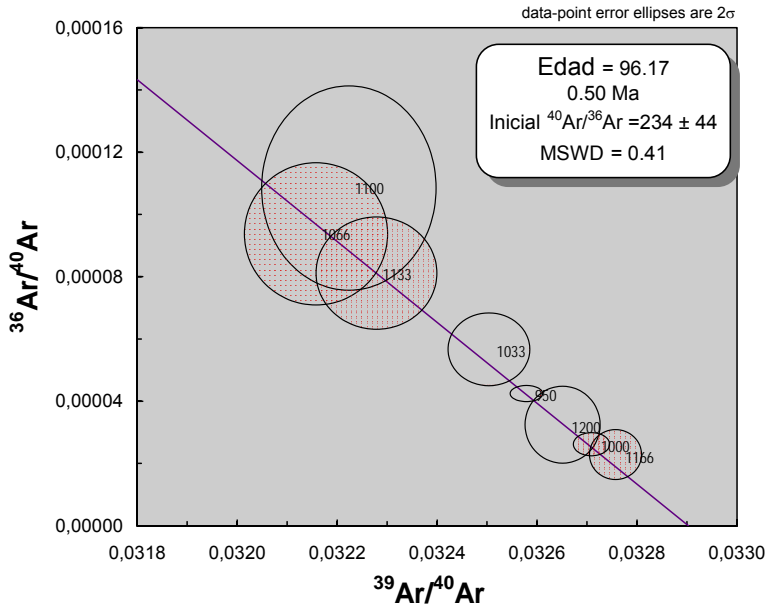
### BIOTITA DOS AMIGOS KP-13



### BIOTITA DOS AMIGOS KP-14

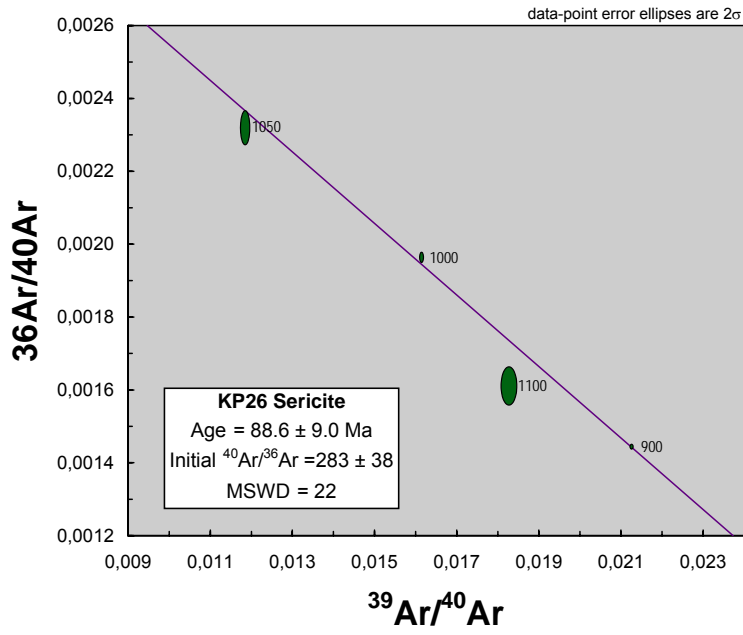


### BIOTITA DOS AMIGOS KP-16

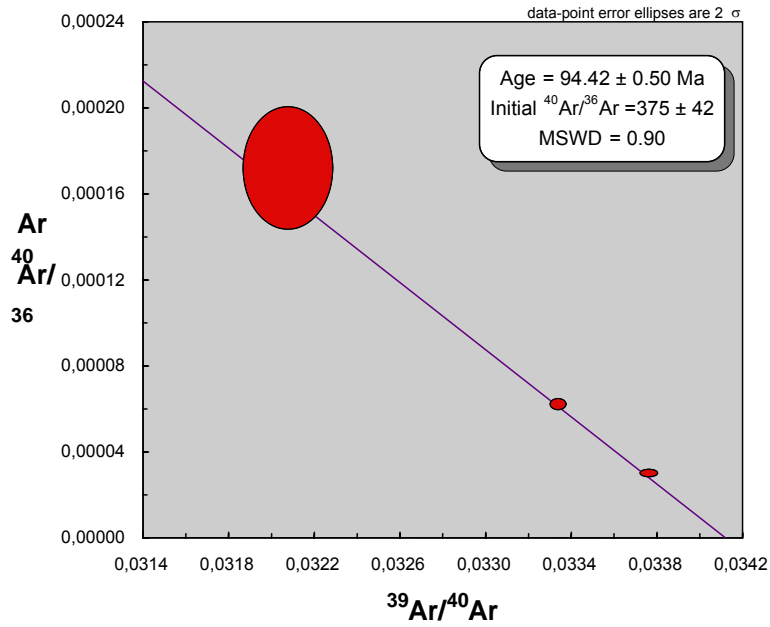




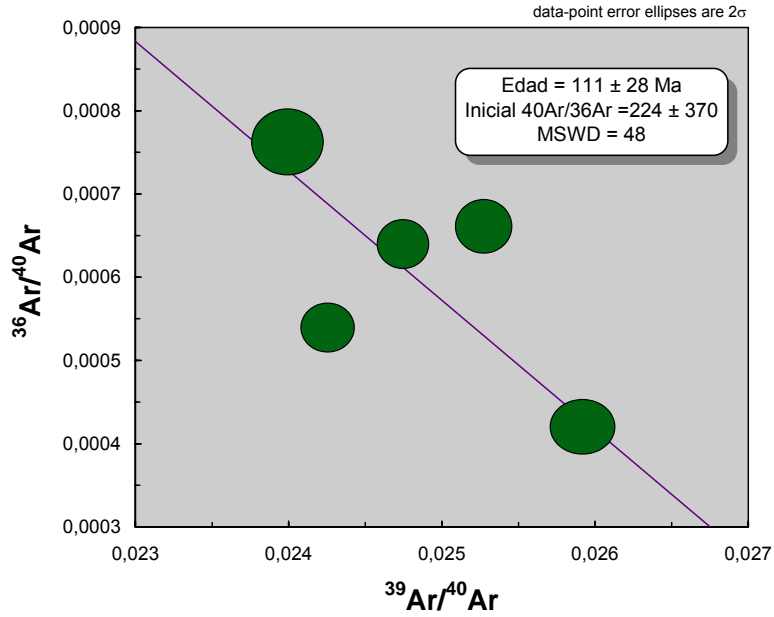
### KP-26 SERICITA BRECHA MARISOL



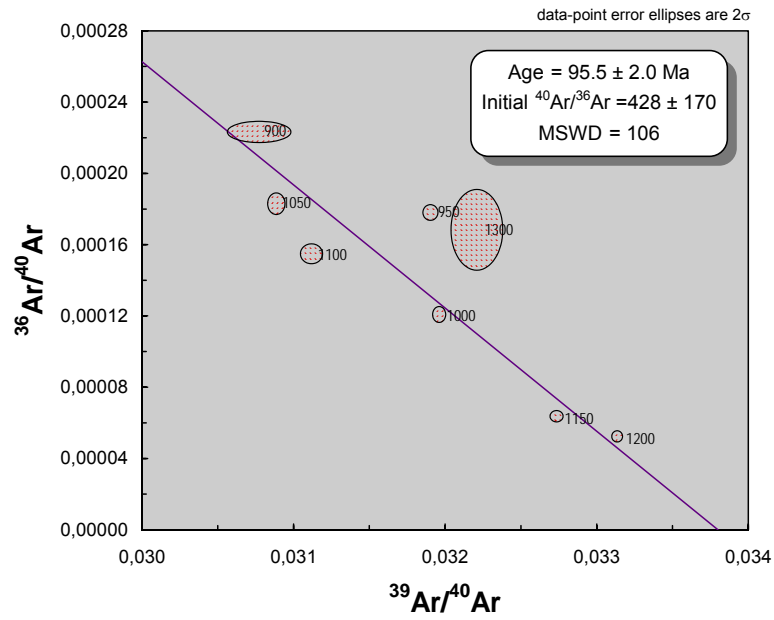
### BIOTITA BATOLITO BANDURRIAS KP-20



### BIOTITA FOLIADA KP-09



### BIOTITA BALTOLITO LAS BANDURRIAS KP-25



## **Anexo III**

## DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE SECCIONES DELGADAS.

### **KP- 08** Pórfido Tricolor. 316912E/6795502N h. 823

Pórfido tonalítico con fenocristales de plagioclasa relativamente frescos, levemente argilizados y pocos ojos de cuarzo subhedrales con extinción ondulosa; biotita diseminada en la masa fundamental parcialmente cloritizada y localmente oxidada, hay diseminación de minerales opacos. La masa fundamental es un agregado cristalino fino de cuarzo-feldespato.

Alteración: potásica (biotita) con cloritización sobreimpuesta y argilización leve

### **KP-09** Pórfido tricolor 316912E/6795450N h. 820

Roca porfirítica fuertemente biotitizada; abundante biotita secundaria fina en general fresca. La foliación de la roca no es muy obvia en el corte, pero si la abundancia de biotita de neoformación.

Alteración: Potásica (biotita), pero con efectos miloníticos.

### **KP-10** Testigo de sondaje, Tricolor

Pórfido tonalítico o diorítico cuarcífero con fenocristales de plagioclasa y de cuarzo subhedral con extinción ondulosa; diseminación de biotita fina secundaria y de minerales opacos.

Alteración: potásica (biotita)

### **KP-11** Roca alterada blanca con pirita diseminada, sector Tricolor 316942E/67955072E h. 998

Roca con textura casi completamente obliterada con abundante cuarzo y pirita diseminada; en parte conserva fenocristales de plagioclasa, pero la mayor parte es un agregado microcristalino de cuarzo y feldespatos argilizados. También hay rosetas de turmalina y una vetilla con agregados radiales de turmalina. Hay mica blanca dispersa en la roca, pero no es abundante.

Alteración: Cuarzo-sericita-pirita-turmalina con argilización sobreimpuesta.

### **KP-12** Andesita biotitizada, zona Tricolor 317053E/6795530N h. 846m

Roca porfírica posiblemente andesita fuertemente biotitizada, con abundante biotita fina y minerales opacos diseminados. Algunas venillas de cuarzo.

Alteración: potásica; fuerte biotitización

**KP-13** Zona Dos Amigos 317 053 E/ 6792032N h. 730m

Pórfido tonalítico a granodiorítico con fenocristales de plagioclasa (algunos argilizados) y ojos de cuarzo, extinción ondulosa; fuertemente biotizado, la biotita en general es fina (secundaria) formando agregados (reemplazo de anfíbolos y biotita primaria) y también diseminada en la roca. Se observan minerales opacos diseminados.

Alteración :potásica (biotita).

**KP-14** Pórfido Dos Amigos 317164E /6791976N h. 852m

Pórfido tonalítico a granodiorítico con fenocristales de plagioclasa y ojos de cuarzo de hasta 4mm de diámetro con extinción ondulosa. Abundante biotita secundaria formando agregados locales y diseminada; localmente hay clorita.

Alteración: potásica(biotita-cuarzo), clorita menor; biotita es abundante, pero es fina.

**KP-16** Pórfido Dos Amigos 317164E/6791976N h.852.

Roca con fuerte alteración cuarzo sericita y argilización sobreimpuesta, presenta sectores con cúmulos de mica blanca relativamente gruesa y sectores argilizados, la textura original esta totalmente destruida.

Alteración Cuarzo-sericita-arcillas.

**KP-20** Pajonales Diorita gris fresca

Roca con textura equigranular fresca de grano medio (Hipidiomórfica granular) con abundante plagioclasa fresca, biotita y hornblenda, con cuarzo y feldespatos potásicos intersticiales.

**KP-25** Tricolor, Tonalita o granodiorita fresca con biotita al oeste de mina Tricolor 316962E/6792959N h.955

Granodiorita de grano medio con textura hipidiomórfica granular, constituida por: plagioclasas, ortoclasa, cuarzo, hornblenda y biotita; minerales opacos diseminados en parte asociados con apatito. Plagioclasas frescas o levemente sericitizadas, ortoclasa micropertítica, cuarzo anhedral intersticial con extinción ondulosa, hornblenda parcialmente cloritizada, magnetita con inclusiones de apatito.

**DAS-6** Zona Dos Amigos Sur, 316814E/6793067 h.1006.

Observación de campo: roca blanca con pintas de color amarillo, posible roca volcánica?, textura destruida.

## Microscopia

Textura holocristalina, porfirítica, hepidiomorfica, leucocrática cristales de hasta 5mm, Plagioclasas (85%) alterada a caolín de grano fino y también caolín, cuarzo (5%), feldespatos (5%), biotitas (3%), accesorios 2% (Zr y otros).

Clasificación de la roca: Andesita porfírica.

Alteración: Argilización a propilítica.

### **TRI-K1** Zona Tricolor, 317021E/6795573N h. 985

Observación de campo: Pórfido cuarzo diorítico, con biotita secundaria y óxidos de Cu (Atacamita-Crisocola).

## Microscopia:

Roca holocristalina, hipidiomórfica de textura porfírica, fenocristales de plagioclasa (55%), en una masa fundamental con granos finos de cuarzo- feldespatos. Se observa intensa alteración de biotita secundaria (30%) a partir de anfibolas y biotita primaria?.  
Diseminación de minerales opacos

Clasificación de la roca: pórfido tonalítico a cuarzo diorítico.

Alteración: potásica (Biotita).

### **TRI-01** Roca Batolito de la Costa 316614E/6794702 h.917

Observación de campo: Granodiorita con textura equigranular, débil alteración de biotitas a magnetita.

## Microscopia

Roca holocristalina, equigranular, fanerítica, cristales de plagioclasas de 1 a 2mm euhedrales débilmente argilizadas (62%), cuarzo anhedral de hasta 1mm (22%), feldespatos débilmente argilizados (13%), biotitas euhedrales (3%).  
Minerales accesorios (5%).

Clasificación de la roca: Granodiorita a monzonita.

Alteración: Argilización supérgena débil a inalterada.

### **TS-1** Zona Dos Amigos, 316750E/6792230N h. 741

Observación de campo: Pórfido con ojos de cuarzo, con alteración de biotita secundaria, lixiviada en zona de fallas.

## Microscopia

Roca Holocristalina-inequigranular-porfirítica de grano medio hepidiomorfica, fenos de plagioclasa alterando a sericita fina (55%), Ojos de cuarzo y en la matriz (25%) , matriz completamente obliterada, se observa relictos de biotita de grano fino.

Clasificación de la roca: Pórfido Cuarzo diorítico.

Alteración: cuarzo-sericita, trazas de caolín con relictos de biotita secundaria.

**DAS-12** Zona Dos Amigos 316845E/ 6791905N h. 768

Observación de campo: Pórfido con alteración cuarzo-sericita, con pintas de hematita, py (1%) calcocita diseminada y en fracturas, con Atacamita y crisocola principalmente.

Microscopia

Roca alterada, Holocristalina, inequigranular, porfirítica de grano medio a grueso (fenocristales). Fenocristales de plagioclasas y ojos de cuarzo en una masa fundamental de cuarzo-sericita fina, biotitas secundarias de grano fino están moderadamente sericitizadas, en las plagioclasas sericitizadas se observan bordes de caolín, textura de roca obliterada.

Clasificación de la roca: pórfido muy alterado.

Alteración: cuarzo-sericita-caolín con relictos de biotita secundaria.

**DAN-08:** Zona Oeste Dos Amigos, 316685E/ 6792329N h 841

Observación de campo: Intrusivo? Alterado de color blanco con alteración cuarzo-sericita-arcillas, con jarosita.

Microscopia

Roca holocristalina-inequigranular-porfírica de grano medio a grueso, fenocristales de plagioclasa que se alteran a illita-caolín, algunos relictos de biotita, roca completamente obliterada, algunos ojos de cuarzo de 4mm, diseminación de opacos.

Clasificación de la roca: Pórfido muy alterado.

Alteración: Argilización (Illita-caolín)

**DAS-1:** Zona Sur Dos Amigos 316917E/6791702N h.826

Observación de campo: Pórfido con ojos de cuarzo con alteración sericita-arcillas color violeta, goethita diseminada, fracturas con alunita supérgena.

Microscopia:

Roca Holocristalina-inequigranular-porfirítica con fenocristales de plagioclasa (60%) alterándose a illita-montmorillonita, fenocristales de cuarzo alargados (30%), en una masa fundamental de arcillas sucias con pintas de goethita, vetillas de cuarzo sin halos, roca muy obliterada.

Clasificación de la roca: Posible dacita porfírica.

Alteración: Argilización intensa (Illita-caolín-montmorillonita)

**MA-10** Zona Marisol, 317162E/6792736N h.982

Observación de campo: Pórfido con alteración cuarzo sericita y hematita, se observan algunas vetillas de cuarzo drúsico.

Microscopia:

Roca Holocristalina-inequigranular-porfírica. Fenocristales de plagioclasa con alteración a sericita-caolín. En una masa fundamental de cuarzo-sericita de grano fino, se observan relictos de biotita, disseminación de minerales opacos hasta 5%, se observa localmente trazas de cloritas y epidota no muy bien definida, textura obliterada.

Clasificación de la roca: Pórfido alterado.

Alteración: Cuarzo-sericita –cloritas.

**MA-5B** Zona Marisol 317392E/6793022N h.1087

Observación de campo: Brecha hidrotermal de turmalina con clastos de líticos subredondeados de pórfido con ojos de cuarzo y alteración cuarzo sericita. También clastos de rocas volcánicas? completamente obliteradas, en una matriz de cuarzo-sericita-turmalina-pirita, se observan algunas vetillas de turmalina, sulfuros de py (10%) y tz de galena., con jarosita-goethita.

Microscopia

Brecha hidrotermal con matriz hidrotermal de cuarzo-sericita-turmalina-goethita, en clastos obliterados se observa illita y algunas esmectitas.

Clasificación de la roca: Brecha hidrotermal de cuarzo-turmalina-sericita.

Alteración: cuarzo-sericita con esmectita e illita supérgena.

**MA-09** Zona este Marisol, 317204E/6792708N h. 1014

Observación de campo: Roca volcánica con alteración argílica supérgena, algo de cloritas y débil epidota, goethita.

Microscopia

Roca holocristalina, inequigranular-porfírica de grano medio, con fenocristales de plagioclasas (56%) alterándose a illita montmorillonita, intercrecida con epidota y cloritas en menor proporción, en una masa fundamental de cuarzo-arcillas de grano fino, la roca esta moderadamente obliterada.

Clasificación de la roca: Posible roca volcánica

Alteración: Propilitización con argilización supérgena.



**TRE-05** Zona sur Tricolor, 316769/6794732N h. 985

Observación de campo: Posible roca volcánica con alteración cuarzo-sericita, goethita-jarrosita. La textura tiene moderada obliteración.

Microscopia

Roca Holocristalina-inequigranular-porfirítica de grano medio panidiomorfica. Plagioclasas (65%) alteradas a sericita, algunas plagioclasas sericitizadas presentan halos de caolín-montmorillonita a los bordes y centro del cristal, feldspatos caolinizados (5%), cuarzo (30%) y minerales opacos hasta 2%, accesorios como trazas de rutilo.

Clasificación de la roca: Posible andesita porfirítica

Alteración: cuarzo-sericita con alteración posterior supérgena de caolín-montmorillonita.

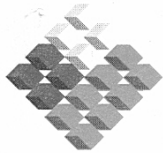
**DAE-04.** Zona este Dos Amigos, 317320E/6792261N h. 873

Observación de campo: Pórfido con ojos de cuarzo, alteración potásica (biotitas) con alteración cuarzo sericita sobreimpuesta?, con fuerte fracturamiento, halo de hematina microscópica.

Roca Holocristalina, inequigranular-porfírica. Fenocristales de plagioclasas alterándose a sericita (55%), ojos de cuarzo de 3 a 4mm, en una masa fundamental de cuarzo-sericita fina que oblitera la roca, se observan relictos de biotita secundaria algunas pasando a cloritas, como accesorio se observa zircón.

Clasificación de la roca: Pórfido cuarzo-diorítico.

Alteración: cuarzo-sericita con relictos de biotita.



GOBIERNO DE CHILE  
SERVICIO NACIONAL DE  
GEOLOGIA Y MINERIA

## Laboratorio de Rayos X

### Informe 59/04

Solicitado por: Sr. Víctor Maksaev J.  
Universidad de Chile  
Cantidad de muestras: 13 ( se solicitan 14)  
Fecha de entrega: 26 de noviembre de 2004

Las muestras se pulverizaron bajo 200 mallas con mortero de ágata y se confeccionaron los difractogramas correspondientes, obteniéndose la siguiente composición mineralógica cualitativa:

1) MA-04

cuarzo, alunita, sericita, caolinita.

2) TRI-04

Cuarzo, andalusita, sericita, caolinita.

3) TRE-07

Cuarzo, andalusita, alunita, caolinita, hematita.

4) DAS-2

Cuarzo, andalusita, sericita, jarosita, illita, caolinita, goethita.

5) MA-08

Cuarzo, andalusita, alunita, goethita, caolinita.

6) TRI-02

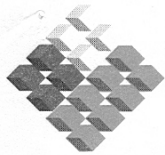
No hay muestra en el sobre

7) TRI-K1

Cuarzo, sericita, caolinita, yeso, andalusita, hematita, posible calcopirita.

8) DAE-02

Halloysita 7-A, cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, illita, sericita(trazas)



GOBIERNO DE CHILE  
SERVICIO NACIONAL DE  
GEOLOGIA Y MINERIA

9) **DAN-7**

Calcita, cuarzo, caolinita, sericita, plagioclasa, hematita.

10) **TRW-1**

Cuarzo, plagioclasa, caolinita, sericita, yeso, vidrio volcánico.

11) **DAE-03**

Cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita, montmorillonita, amarantita, caolinita.

12) **LABOR-TRI**

Cuarzo, yeso, brochantita, atacamita.

13) **DAS-13**

Cuarzo, alunita, jarosita, illita, plagioclasa, hematita, goethita, amarantita.

14) **TS-3**

Cuarzo, hematita, alunita, jarosita, illita, sericita, plagioclasa, feldespato potásico, crisocola, brochantita (trazas).

Se anexan los diagramas correspondientes.

Eugenia Fonseca P.

Geóloga

Laboratorio de Rayos X y Mineralogía