

SISTEMAS HIDROTERMALES ASOCIADOS A CALDERAS EN EL ARCO VOLCANICO PALEOGENO DE LA REGION DE ANTOFAGASTA, CHILE: DISTRITOS EL GUANACO, CACHINAL DE LA SIERRA Y EL SOLDADO

ALVARO PUIG G.
SERGIO DIAZ B.
LUCIA CUITIÑO G.

Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10485, Santiago, Chile

RESUMEN

Los yacimientos epitermales El Guanaco (Au, Cu), Cachinal de La Sierra (Ag) y El Soldado (Ag), ubicados entre 24°52'-25°06' y 69°32'W, están genéticamente relacionados con un sistema de calderas anidadas del Paleoceno-Eoceno Inferior. Las rocas y estructuras volcánicas del área permiten identificar las etapas del desarrollo de una caldera, según los modelos evolutivos aceptados. Así, las unidades Diorita Cachinal y Lavas Andesíticas de Piroxeno (62-60 Ma) caracterizan a las etapas iniciales; la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco representa el gran volumen de emisión de tobas a los 61 Ma. Luego, un complejo de lavas y domos es emplazado asincrónicamente de norte a sur (60-55 Ma, respectivamente). El domo resurgente se caracteriza por las tobas del piso de la caldera flectadas anticlinalmente e intrudidas por diques lacolíticos. En las etapas finales, se originaron campos fumarólicos y actividad hidrotermal asociados con el emplazamiento de los domos. Los yacimientos El Soldado, Cachinal de la Sierra y El Guanaco se relacionan con etapas tardías del sistema de calderas y están controlados por sus estructuras. El mineral El Soldado tiene vetas polimetálicas dispuestas radialmente a la caldera del mismo nombre. Cachinal de la Sierra consiste en un sistema de vetas paralelas a la fractura del borde de la Caldera Cachinal. La asociación de minerales de alteración, en estos dos distritos, es semejante a la descrita para los yacimientos del tipo Adularia-Sericita. El Guanaco está controlado por una estructura aproximadamente este-oeste que corta por el sur a la misma caldera. La mineralogía de alteración presente es equivalente a la descrita para los yacimientos del tipo Acido-Sulfato o Enargita-Oro.

Palabras claves: Calderas anidadas, Yacimientos epitermales, El Guanaco, Cachinal de La Sierra, El Soldado, Terciario inferior, K-Ar, Antofagasta, Chile.

ABSTRACT

The epithermal deposits of El Guanaco (Au, Cu), Cachinal de La Sierra (Ag) and El Soldado (Ag) are located 24°52'/25°06'S, and 69°32'W, and genetically related with a Paleocene-Eocene volcanic arc. A two resurgent cauldrons model is proposed for the evolution of the volcanic sequence, between El Soldado and El Guanaco districts. This hypothesis is supported by a detailed geological mapping, petrographic studies and 26 K-Ar datings carried out on hydrothermally altered to fresh mineral concentrates of the area. The western part of the 30 km diameter cauldron (Caldera Cachinal) is the only one preserved, and Cachinal de La Sierra as well as El Guanaco ores are emplaced at its margin. The El Soldado ore is located at the intersection between this cauldron and another one (Caldera El Soldado), 8 km in diameter, which was emplaced, 7 Ma later, north of the former one. Early stages are represented by a dioritic porphyric stock (Diorita Cachinal), spatially and genetically related with pyroxene andesitic lavas (Andesitas de Piroxeno Unit), with crystallization ages of 62, 61 and 60 Ma. The Tobas Cachinal-Guanaco Unit, as a major ash-flow eruption at 61 Ma. The collapse of the cauldron is observed at the Peñafiel fracture as a remarkable N-S structure. The uplift of the resurgent dome is extended eastward where the raised floor of the caldera is depicted by local structures parallel to dacitic dikes and laccolithic stocks. The dacitic domes (Domos Dacíticos Unit) were emplaced along the Peñafiel fracture. These domes were emplaced with their related lava-dome (Dacitas y Andesitas de Plateau Unit) and asynchronously emplaced from north to south (59-55 Ma, respectively). The ore deposits are controlled by the cauldron structures, and mineralization is genetically related with the latest stages of the dacitic domes, since the age of sericite in two different veins is 59 Ma.

Mineralization of El Soldado deposit is emplaced in faults striking N15°W, north of the area. Ag and minor polymetallic ores (Zn, Pb, Au) have been mined. The Cachinal de La Sierra veins present an alteration assemblages mineralogy similar to the Adularite-Sericite type deposits, with restricted pervasive silicification of the host tuffs. Mineralization is main-

ly formed by argentiferous galena, pyrrargirite, together with quartz (amethyste)-adularite-fluorite gangue minerals. At El Guanaco the same is related with E-W fracture-controlled strong silicification zones, surrounded by an irregularly distributed advanced argillic alteration zone (quartz, alunite, kaolinite, dickite). The enriched ore bodies are composed of native gold, barite, hematite and alunite, located in fractures within the silica zones. Mineralization consists mainly of pyrite, enargite, luzonite and minor chalcocopyrite. These mineral assemblages are similar to those described for the Acid-Sulphate or Enargite-Gold type deposits.

Key words: Nested calderas, Epithermal deposits, El Guanaco, Cachinal de La Sierra, El Soldado, Lower Tertiary, K-Ar, Antofagasta, Chile.

INTRODUCCION

La evolución geológica de los Andes Centrales (Jordan *et al.*, 1983) se caracteriza, fundamentalmente, por una sucesión de eventos magmáticos, desde el Triásico Superior al Reciente, que son una respuesta a la subducción de la corteza oceánica del Pacífico bajo Sudamérica. Esta actividad ígnea se manifiesta no sólo como productos efusivos, volcánicos, subvolcánicos o plutónicos, sino también, como sistemas hidrotermales que producen concentraciones económicas de minerales, tales como los que se describen en el presente trabajo.

En los Andes de la Región de Antofagasta, Chile, el sistema arco magmático-cuenca extensional de trasarco, característico del período Jurásico-Cretácico Inferior, se modificó como consecuencia de la fase deformativa meso-cretácica (Coira *et al.*, 1982), a una configuración de arcos volcáni-

cos intracontinentales de rumbo NNE-SSW. Los yacimientos descritos en este trabajo (Fig. 1) están genéticamente relacionados con el arco volcánico, que habría comenzado su actividad durante el Terciario inferior o, posiblemente, en el Cretácico Superior (Naranjo y Puig, 1984), desarrollado después de dicha fase deformativa. Las rocas producto de este evento se encuentran emplazadas aproximadamente 100 km al occidente de la cadena volcánica activa de los Andes Centrales (Fig. 2).

El propósito de este trabajo es presentar la estratigrafía, petrografía, cronología y distribución espacial de los eventos ígneos, asociados a la mineralización polimetálica de carácter epitermal, existentes en el área comprendida en los distritos El Guanaco, Cachinal de La Sierra y El Soldado. Con estos antecedentes se pretende relacionar dichos

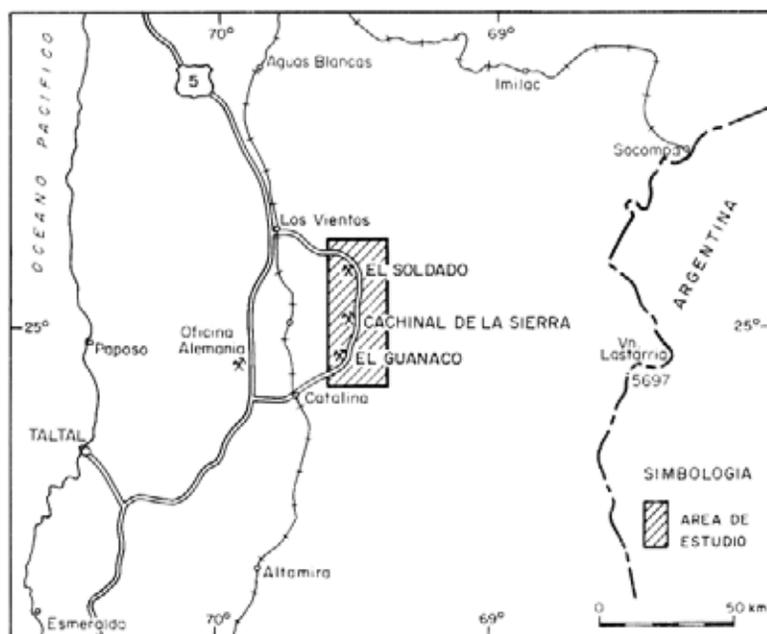


FIG. 1. Mapa de ubicación y principales accesos al área de estudio.

yacimientos con la evolución de estructuras volcánicas de carácter regional tipo calderas, desarrolladas durante el Paleoceno y Eoceno Inferior.

Para tal efecto, se realizó el levantamiento geológico de superficie a escala 1:20.000 del área antes mencionada (de aproximadamente 260 km²). Se efectuaron 26 determinaciones radiométricas K-Ar en rocas volcánicas frescas y en minerales producto de la alteración hidrotermal, además de estudios petrográficos de detalle de las rocas volcánicas y de las vetas que configuran los respectivos distritos mineros.

Los antecedentes geológicos regionales se encuentran sintetizados en las Cartas Geológicas Taltal y Chañaral, escala 1:250.000 (Naranjo y Puig, 1984). Además, se obtuvo valiosa información de carácter geológico-minero, que permanece inédita, de los siguientes geólogos o instituciones: Boric, R. *et al.*: Mapa Metalogénico II Región; Complemento. *Servicio Nacional de Minería-CORFO*, 1984; Chong, G. *et al.*: Proyecto Palestina; Primera Parte. *Universidad del Norte-Gobierno Regional II Región*, 1976; Egaña, P.: Geología, alteración, mineralogía y prospección del yacimiento El Guanaco, II Región. *Empresa Nacional de Minería*, 1978; Greiner, G.: Proyecto Cachinal. Antecedentes de evaluación geológica del distrito argentífero de Cachinal de La Sierra, II Región. *Empresa Nacional de Minería*, 1978; Llaumett, C.: Evaluación geológica del distrito minero El Guanaco, II Región. *Empresa Nacional de Minería*, 1979; Llaumett, C.: Estudio geológico, geoquímico, geofísico y evaluación de recursos del distrito argentífero Cachinal, II Región. *Empresa Nacional de Minería*, 1980; Llaumett, C. *et al.*: Estudio geológico preliminar del distrito minero

El Guanaco, II Región. *Empresa Nacional de Minería*, 1976; SERNAGEOMIN-JICA-MMAJ: Informe de estudios básicos sobre la exploración de recursos del área al sur de Antofagasta. Fases 1 y 2. *Servicio Nacional de Geología y Minería - Japan International Co-operation Agency - Metal Mining Agency of Japan*, 1986-1987; Universidad del Norte, Departamento de Geociencias: Proyecto Palestina. Segunda Parte. *Universidad del Norte*, 1978. Todos estos informes pueden ser consultados en la Biblioteca del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Morfológicamente, el área estudiada se caracteriza por dos cadenas de relieves elevados, cuya intersección configura la cabecera de la quebrada Cachinal de La Sierra. Esta quebrada drena hacia el norte y es tributaria de la quebrada El Profeta. La sierra Peñafiel conforma la cadena de elongación norte-sur, con alturas entre 3.000 y 3.200 m s.n.m. La otra es la sierra del Relincho, de elongación ENE y alturas entre 2.800 y 3.000 m s.n.m. En estos sectores existe una buena exposición de los afloramientos de rocas. Hacia el este de Sierra Peñafiel, en la parte baja, se ubica el distrito minero Cachinal de La Sierra, a una cota de 2.700 m. Desde estas localidades hacia el este se extienden los llanos que anteceden a Cordillera de Domeyko. Sólo a 8 km de Cachinal de La Sierra está el cerro Islote, como única prominencia antes de Cordillera de Domeyko (a una distancia >25 km) (Figs. 2, 3). El Distrito El Guanaco se ubica en el margen sur de Sierra del Relincho. Queda configurado por dos cerros (La Estrella y Guanaquito), que sobresalen en el relieve suave desarrollado hacia el sur (Figs. 4, 5).

MARCO GEOLOGICO REGIONAL

En el área donde se ubican los distritos de El Soldado, Cachinal de La Sierra y El Guanaco, afloran rocas volcánicas del Terciario inferior, asignadas en este sector a la Formación Chile-Alemania (*sensu* Naranjo y Puig, 1984). Esta unidad es de carácter subcalcalino (Naranjo y Puig, *op. cit.*) y está constituida por rocas de composición variada, desde extremos basálticos a riolíticos, siendo los más abundantes los términos andesíticos y dacíticos. La Formación Chile-Alemania se dispone subhorizontalmente, con manteos que, en general, corresponden a inclinaciones originales de las lavas.

Está cubierta, en discordancia de erosión, por las Gravas de Atacama, de edad oligo-miocena (Mortimer, 1973) y sobreyace, en discordancia angular, a rocas sedimentarias clásticas de la Formación Santa Ana (Cretácico Inferior) y unidades más antiguas (Naranjo y Puig, *op. cit.*). Presenta edades radiométricas entre 66 y 43 Ma. Estos autores, sin embargo, no descartaron la posibilidad de que el magmatismo en el área se hubiera iniciado a fines del Cretácico Superior, con las rocas volcánicas denominadas Estratos del Estanque de 72 Ma y los Pórfidos Pampa Mirador de 78-75 Ma.

La figura 2 presenta un perfil esquemático simplificado, a la latitud de 25°S, donde se aprecian

las rocas que conforman el substrato del arco magmático volcánico del Terciario inferior.

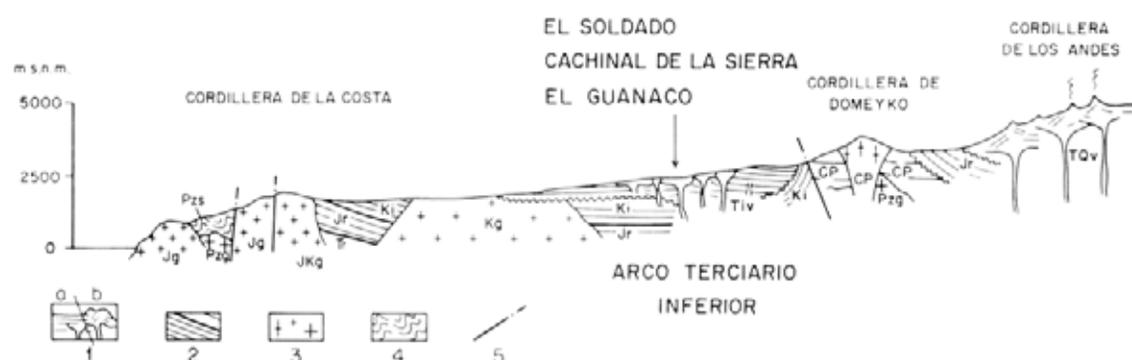


FIG. 2. Perfil esquemático, no a escala, a la latitud 25°S (extractado de Naranjo y Puig, 1984), que muestra las principales unidades de roca, sus edades y relaciones estratigráficas simplificadas. 1a. Arco volcánico del Terciario inferior (erosionado); 1b. Arco volcánico del Terciario inferior-Reciente; 2. Rocas estratificadas, sedimentarias y/o lavas; 3. Rocas intrusivas, principales cuerpos batolíticos; 4. Rocas metasedimentarias; 5. Fallas principales; Pzg: Paleozoico intrusivo (Grupo Plutónico Punta del Viento); Jg: Jurásico Superior intrusivo (Grupo Plutónico Matancilla); JKg-Kq: Cretácico Inferior intrusivo (Grupo Plutónico Cerro del Pingo); Pzs: Paleozoico sedimentario (Formación Las Tórtolas); Tr Triásico Superior sedimentario (Formación Cifuncho); CP: Carbonífero-Pérmico volcánico (Formación Las Tablas); Jr: Jurásico sedimentario-volcánico (Formaciones Pan de Azúcar, La Negra, El Profeta); Ki: Cretácico Inferior clástico (Formaciones Aeropuerto, Santa Ana); Tiv: Terciario inferior volcánico (Formación Chile-Alemania); TQv: Mioceno-Reciente (Estrato-volcanes e ignimbritas de los Andes).

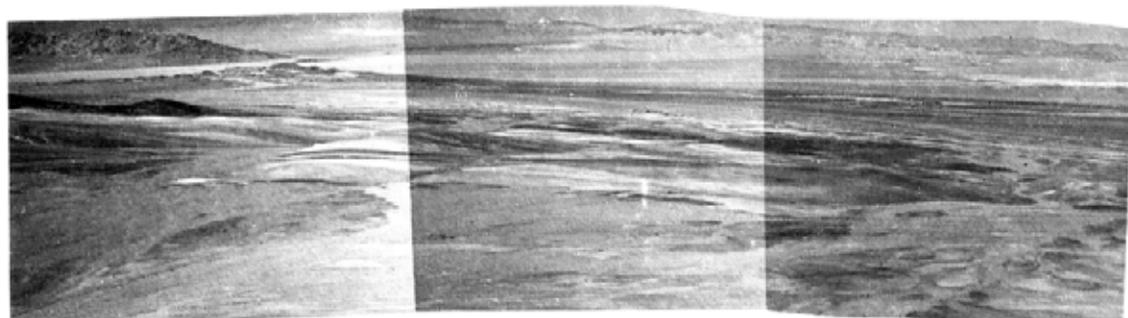


FIG. 3. Vista panorámica del Distrito Cachinal de La Sierra, desde el cerro Peñafiel hacia el ENE. Destaca el cerro Islote y, al fondo, la Cordillera de Domeyko.



FIG. 4. Vista de Cerro La Estrella, Distrito El Guanaco.

GEOLOGIA DEL AREA EL SOLDADO-CACHINAL DE LA SIERRA-EL GUANACO

En el área estudiada, la Formación Chile-Alemania está compuesta por cuerpos subvolcánicos y rocas efusivas (lavas y piroclásticas). Estas rocas se han agrupado en ocho unidades, que, junto a sus relaciones estratigráficas y estructurales, caracterizan los diferentes productos volcánicos que configuran las etapas de evolución de un sistema de calderas según el modelo presentado por Smith y Bailey (1968). Se describen, a continuación, las características petrográficas y estratigráficas de dichas unidades de rocas, de más antigua a más joven, las cuales, a su vez, están representadas en el mapa geológico de la figura 5.

Las etapas iniciales del desarrollo del sistema de calderas en estudio, representadas por las Unidades Diorita Cachinal y Lavas Andesíticas de Piroxeno; más tarde, se deposita la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco, caracterizando un importante volumen de tobas ignimbríticas extruidas, asociadas al colapso de la caldera. Luego se depositan e intruyen, respectivamente, las Unidades de Dacitas y Andesitas de Plateau y los Domos Dacíticos, como un sistema de lavas y domos emplazados a lo largo de la fractura del borde (Fractura Peñafiel) de la caldera. La Unidad de Conglomerados y Areniscas Verdes representan los depósitos de relleno de cuencas endorreicas dentro de la caldera. Finalmente, se ubican las Unidades de Pórfidos Andesíticos en el sector El Guanaco y Cuello Andesítico en el sector de Cachinal de La Sierra.

Diorita Cachinal

Las rocas más antiguas del área corresponden a un "stock" diorítico (anteriormente denominado Granodiorita Cachinales), que aflora en el distrito minero Cachinal de La Sierra. Presenta variaciones texturales desde porfídica a equigranular, de grano medio a fino.

Petrográficamente, corresponde a una diorita de piroxeno (Streckeisen, 1976), constituida por plagioclasa tipo andesina (80-90%), piroxeno tipo augita (5-10%) y opacos (1-2%) (Tabla 1). Generalmente, la plagioclasa presenta alteración a caolinita y sericita; en algunas muestras, se observó un reemplazo de feldespato potásico como parches en la plagioclasa, interpretados como producto de la actividad neumatolítica en la diorita.

Las observaciones de terreno permiten establecer pertenencias a la Unidad de Domos Dacíticos, y

pertenecientes a la Unidad de Domos Dacíticos, y estaría parcialmente cubierta por las unidades de Tobas Cachinal-Guanaco y Lavas Andesíticas de Piroxeno. Los términos de grano fino de la Diorita Cachinal presentan características petrográficas similares a la unidad de Lavas Andesíticas de Piroxeno, que afloran en la parte norte de Cachinal de La Sierra. Estos antecedentes permiten suponer una estrecha relación genética entre ambas unidades.

De la Diorita Cachinal se han obtenido dos edades K-Ar en plagioclasa, una alterada a sericita y la otra con reemplazo a feldespato potásico, de 55,8 y 61,7 Ma, respectivamente (Tabla 2).

Andesitas de Piroxeno

Esta unidad aflora al norte y noroeste del distrito Cachinal de La Sierra y al oriente de El Guanaco.

Corresponden a lavas de textura porfídica, fina a afanítica y masa fundamental traquítica, con microlitos de plagioclasa y abundante material ferruginoso intersticial. Los fenocristales son de plagioclasa y clinopiroxeno, tipo augita, con escaso ortopiroxeno. La alteración es moderada, aunque en los minerales máficos es intensa, a clorita, epidota y calcita (Tabla 1).

Debido a la mala exposición de sus afloramientos no se ha observado claramente su posición estratigráfica; sin embargo, en el sector de Cerro La Isla, las andesitas de piroxeno están cubiertas por tobas de cristales, ignimbríticas, asignadas a la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco. Por otro lado, en una zona de contacto entre estas unidades se observaron clastos accidentales de tobas incorporados a las lavas.

Las relaciones de techo observadas para la Unidad de Andesitas de Piroxeno sugieren una interdigitación entre esta última y los niveles inferiores de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco. La base de la Unidad de Andesitas de Piroxeno corresponde a la Diorita Cachinal, evidenciada por la presencia de clastos accidentales de diorita en estas lavas.

Las Andesitas de Piroxeno, que afloran en el extremo suroccidental del área, cubiertas por tobas de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco, se asignan a esta unidad por su litología y relaciones estratigráficas. Sin embargo, se cree que habrían sido ori-

ginadas a partir de centros diferentes, y no corresponden a la extensión septentrional de las andesitas que afloran inmediatamente al norte de Cachinal de La Sierra.

Las dos dataciones K-Ar en roca total de estas andesitas (60,2 y 60,7 Ma; Tabla 2) son similares a la obtenida para la Diorita Cachinal. Por esta razón, más su similitud mineralógica, distribución espacial y relaciones estratigráficas, es que se ha considerado a las Andesitas de Piroxeno como genéticamente relacionadas con la Diorita Cachinal.

Tobas Cachinal-Guanaco

Se designa con este nombre a las tobas con intercalaciones lenticulares de areniscas, que se extienden por toda el área estudiada y que tienen una edad intermedia dentro de la evolución geológica de ésta. La Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco está formada por tobas de cristales, ignimbríticas, con desarrollo en algunos sectores de vitrófiro basal, además de tobas de lapilli y líticos. En forma muy subordinada, hay areniscas de constituyentes volcánicos. Constituyen, fundamentalmente, la roca huésped para las vetas de Cachinal de La Sierra, de El Guanaco y de El Soldado, en los niveles más profundos.

La mejor exposición de ellas corresponde a las partes bajas de Sierra del Relincho, donde se exponen más de 100 m de tobas de cristales, en una disposición monoclinal subhorizontal.

El tipo predominante de tobas presenta una textura piroclástica, con matriz vítrea soldada, estructuras de fluidez y abundantes "shards". Generalmente, la matriz se encuentra silicificada y, en parte, parcialmente alterada a caolinita y montmorillonita, observándose en estos últimos casos, entrecrecimientos de cuarzo microcristalino con las arcillas. Los fragmentos de las tobas (40-60%) están constituidos, predominantemente, por cristales de cuarzo y feldspatos (40-50%), escasa biotita y anfíbolos oxidados. Los fragmentos líti-

cos (<20%) corresponden a tobas y andesitas oxidadas (Tabla 1).

Las tobas se encuentran cubiertas por la Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau aunque, localmente, se observan intercaladas en estas rocas. En general, se depositaron sobre las Andesitas de Piroxeno y sobre la Diorita Cachinal.

En el sector de Cerro Limbo, forman una leve flexura cuyo eje buza 20-25° al SSE, con rumbo de sus flancos que varían desde N20°E hasta N60°W. En general, no ha sido posible diferenciar, en el mapa, los diversos tipos de tobas ni determinar un espesor real para esta unidad. Sin embargo, en el sector de Cerro Limbo, se exponen más de 100 m de tobas de cristales, ignimbríticas, con 10-15 m de vitrófiro basal, pudiendo corresponder estos afloramientos a un solo depósito o, a lo más, a dos niveles diferentes.

En esta unidad se efectuaron cinco dataciones radiométricas K-Ar (Tabla 2), interpretando las de $60,4 \pm 1,6$ y $60,6 \pm 1,7$ Ma como edad de deposición. Las restantes edades se obtuvieron de minerales de alteración o de rocas totales alteradas (Tabla 2).

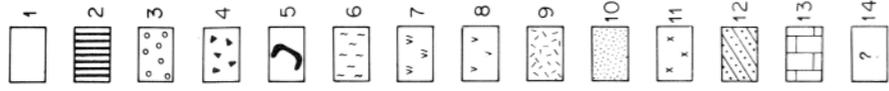
Marinovic (comun. verbal) indicó que una muestra de toba ignimbrítica, de iguales características, ubicada 40 km al noroeste del área, dio una edad K-Ar de $60,2 \pm 2,4$ Ma. Esta toba puede corresponder a la extensión occidental de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco.

Dacitas y Andesitas de Plateau

Esta unidad está constituida por dacitas y andesitas que configuran plateaux horizontales a subhorizontales, especialmente al oeste del cerro Peñafiel. Localmente, se observan rellenando paleo-depresiones. En forma predominante, corresponden a dacitas con andesitas subordinadas. En algunas localidades, se observó una gradación des-

FIG. 5. Mapa geológico del área estudiada. 1. Depósitos terciarios y cuaternarios de gravas y arenas no consolidadas; 2. Pórfido andesítico, pre-mineralización, sector El Guanaco y cuello volcánico andesítico de 43 Ma (post-mineralización), sector Cerro La Isla; 3. Areniscas y conglomerados verdes con clastos volcánicos; 4. Brechas hidrotermales (monométicas), asociadas a los domos dacíticos; 5. Vidrio perfitico, como margen de enfriamiento; 6. Unidad Domo Dacíticos; 7. Unidad Dacitas y Andesitas de Plateau del sector Cerro Limbo; 8. Dacitas y Andesitas de Plateau subhorizontales, asociadas a los domos dacíticos; 9. Tobas de lapilli e ignimbríticas de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco; 10. Lavas andesíticas de piroxeno; 11. Diorita de piroxeno (Diorita Cachinal); 12. Areniscas multicolores de la Formación Santa Ana (de Naranjo y Puig, 1984); 13. Calizas y areniscas calcáreas de la Formación El Profeta, según Naranjo y Puig (*op. cit.*); 14. Rocas volcánicas indiferenciadas. 15. Contacto geológico; 16. Vetas; flechas indican manto; 17. Vetas subverticales; 18. Rumbo y manto de los estratos; 19. Rumbo y manto de planos de clivaje; 20. Cúspide de domos dacíticos identificados; 21. Sector con alteración hidrotermal argílica y/o silicificación; 22. Fallas y fallas cubiertas.

LEYENDA



SIMBOLOGIA

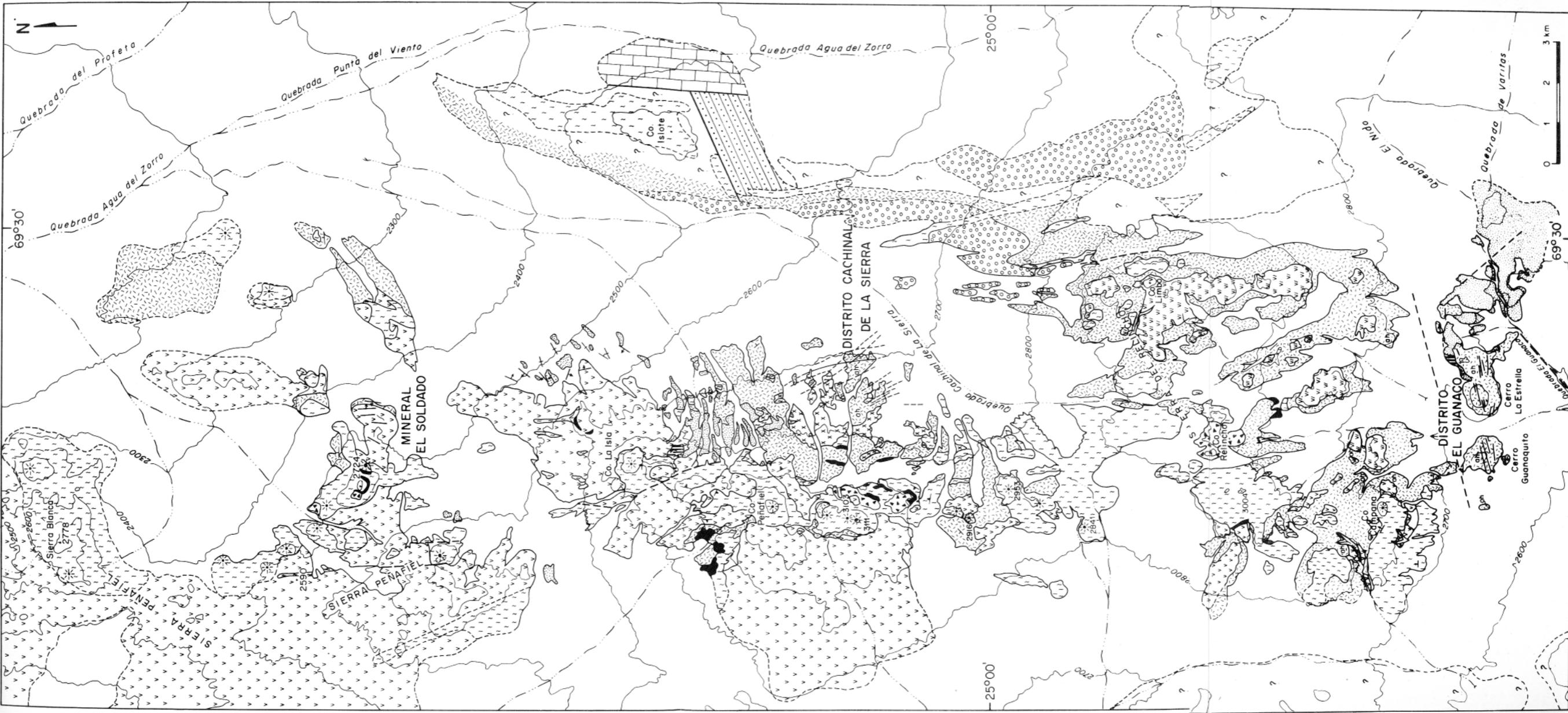


TABLA 1. PETROGRAFIA Y ALTERACION DE LAS UNIDADES DESCRITAS, ENTRE LOS 24°52' Y 25°06'S: DISTRITOS EL GUANACO, CACHINAL DE LA SIERRA Y EL SOLDADO

No. Muestra	Clasificación	Textura	Mineral. Primaria					Minerales de Alteración					Aspecto fresco				
			Qz	Pl	Or	Px	Oi	Ka	Mo	Se	F-K	Bi		Ja	Ca	Cl	Ep
Diorita Cachinal																	
BAP-6	Diorita de piroxeno	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular, porfídica	xxx	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Aspecto fresco
BAP-40	Diorita de piroxeno, porfídica	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular, porfídica	xxx	xx	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Muy alterada
BAP-51	Diorita de piroxeno	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular, porfídica	xxx	xx	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BLC-2	Diorita de piroxeno, porfídica	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular, cataclásica	xxx	xx	x	x	x	x	xx	xx	xx	x	x	x	x	x	
BLC-N3-13 (vea)	Diorita de piroxeno	Holocristalina, idiomorfa, equigranular	xxx	xx	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BLC-9	Microdiorita de piroxeno y olivino	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular, porfídica	x	xxx	x	x	x	x	x	x	xx	xx	xx	x	x	x	
BSD-5	Diorita de piroxeno	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular	x	xxx	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BSD-9	Diorita de piroxeno	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular	xxx	xx	x	x	x	xxx	x	xx	x	xx	x	Alterada			
BAP-21	Diorita	Holocristalina, idiomorfa, inequigranular															
Andesita de Piroxeno																	
BAP-144	Andesita de piroxeno	Porfídica	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	x	xx	xx	x	
BAP-148	Andesita de piroxeno	Porfídica fina	x	x	x	xxx	x	xxx	x	xxx	x	x	x	x	x	x	
BAP-163	Andesita de piroxeno	Porfídica gruesa	xxx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	x	xx	xx	x	
BLC-115	Andesita porfídica de piroxeno	Porfídica gruesa	xxx	x	x	xxx	x	xxx	xx								
BSD-1	Andesita porfídica de piroxeno	Porfídica gruesa	xxx	x	x	xxx	x	xxx	xx								
Dacitas de Plateau																	
BAP-5	Dacita de anfíbola y biotita	Porfídica	x	x	x	x	xxx	x	xxx	x	x	x	x	x	x	x	
BAP-7	Andesita de piroxeno	Porfídica	xx	x	x	xxx	x	xxx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
BLC-16	Dacita de biotita	Porfídica	xx	x	x	xxx	x	xxx	xx	x	x	x	x	x	x	x	
BLC-3	Andesita de piroxeno	Porfídica	xx	x	x	xxx	x	xxx	xx	x	x	x	x	x	x	x	
BSD-221	Dacita de biotita	Porfídica	x	x	x	xxx	x	xxx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
BSD-222	Dacita de biotita	Porfídica	x	x	x	xxx	x	xxx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
(Cerro Lumbo)																	
BLC-134	Andesita	Porfídica	x	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
Domos Dacíticos																	
BAP-1	Dacita de biotita y anfíbola	Porfídica	xx	x	x	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	x	
BAP-11	Dacita de biotita	Porfídica	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	x	
BLC-1	Dacita de biotita	Porfídica	x	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
BAP-222	Dacita de biotita	Porfídica gruesa	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
BLC-112	Dacita de biotita y anfíbola	Porfídica gruesa	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
BSD-118	Dacita de piroxeno	Porfídica gruesa	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
Tobas Cachinal-Guanaco																	
(Sector Cachinal)																	
BAP-13	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	x	xx	xx	x	
BAP-14	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	x	xx	x	x	x	x	x	x	x	xx	x	x	
BAP-15	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	x	xx	x	x	x	x	x	x	x	xx	x	x	
BAP-22	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	x	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
BAP-27	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	x	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	x	x	x	x	x	
BAP-28	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	x	x	x	xxx	x	xxx	x	x	xx	x	x	x	
BAP-29	Toba fina de cristales	Piroclástica fina	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	x	x	
BAP-38B	Toba fina de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	x	x	
BAP-52	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	x	xx	x	x	xx	x	x	xx	x	x	xx	x	x	x	
BAP-74	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	x	
BLC-8	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	x	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	x	x	
BLC-11	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	x	x	x	x	x	xx	x	x	xx	x	x	x	
BLC-14	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	x	x	
BLCV-17	Toba soldada de cristales	Piroclástica fina	xxx	x	x	xxx	x	xxx	x	xxx	x	x	xx	x	xx	x	
BSD-20	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	
BSD-146	Toba soldada de cristales	Piroclástica gruesa	xx	x	x	xx	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	
BSD-131	Toba soldada de cristales y lítico	Piroclástica gruesa	x	x	x	x	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	
(Sector Guanaco)																	
BSD-133	Toba soldada de cristales y líticos	Piroclástica gruesa	x	x	x	x	xx	x	x	xx	x	x	xx	x	xxx	x	
BSD-136	Toba soldada de cristales y líticos	Piroclástica gruesa	x	x	x	x	xx	xx	xxx	xxx							
BSD-139	Toba soldada de cristales y líticos	Piroclástica gruesa	x	x	x	xx	xx	xx	xx	xx	x	x	xx	x	xx	xx	
BSD-143	Toba soldada	Piroclástica	x	x	x	x	xxx	x	xxx	x	xxx	x	xxx	x	xx	x	
BSD-144	Toba soldada	Piroclástica	x	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	x	xxx	x	xx	x	xx	
BSD-147	Toba soldada de cristales y líticos	Piroclástica gruesa	x	x	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	x	xxx	x	xxx	xxx	xx	
BSD-158	Toba soldada de cristales y líticos	Piroclástica fina	x	x	x	x	xxx	x	xxx	xxx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	
BSD-159	Toba soldada de cristales	Piroclástica	x	x	x	x	xxx	x	xxx	xxx	x	x	xxx	x	xx	xx	

Nota:

1. Abundancia: x = escaso; xx = moderado; xxx = abundante.

2. Qz: cuarzo; Pl: plagioclasa; Or: ortoclasa; Px: piroxeno; Ol: olivino; Ka: caolinita; Mo: monimolinita; Se: sencia; F: K: feldespatos potásico; Bi: biotita; Ja: jarosita; Ca: calcita; Cl: clorita; Ep: epidota; An: anhidrita; Vi: vidrio; Si: silice; Sh: shard; Ad: adularia; Fl: fluorta; Po: pómez; Pi: pirofilita; Ba: bantina; Op: ópalo; Li: líticos; Al: alunita

de términos dacíticos a andesíticos. Aflora, principalmente, en los sectores de los cerros La Isla y Peñafiel, al sur de éste y en el extremo norte y noreste del área. Además, en forma aislada, entre los cerros Relincho y Campana.

Las dacitas tienen masa fundamental microfelsítica fluida. Los fenocristales (30%) corresponden a plagioclasas (20-30%) del tipo andesina (An_{40}); en algunas muestras se observó alteración sericitica y caolinitica en las plagioclasas. Los minerales máficos (1-2%) corresponden a biotita. Las andesitas presentan una masa fundamental traquítica. Los fenocristales (30%) son de plagioclasa (20-30%) tipo andesina (An_{40-45}). Los minerales máficos (5%) corresponden a anfíbola y piroxeno, alterados a una mezcla de clorita, óxidos de hierro y calcita (Tabla 1).

Estas rocas sobreyacen a la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco y son, localmente, intruidas por domos dacíticos. Sin embargo, en algunos sectores, están intercaladas en los niveles superiores de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco.

Edades K-Ar (Tabla 2) obtenidas para estas rocas indican $58,5 \pm 1,6$ Ma (biotita) en el sector sur del cerro Peñafiel; $54,4 \pm 2,5$ Ma (roca total) en el sector del cerro Campana; y $52,6 \pm 1,9$ Ma (roca total) en el sector de El Soldado. Por afinidad petrográfica, cronología y disposición de sus afloramientos, se considera que esta unidad representa las manifestaciones subaéreas de la Unidad de Domos Dacíticos.

Se denomina **Andesitas Cerro Limbo** la secuencia de andesitas dacíticas, que pertenece a la Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau, pero que tiene una distribución localizada, desconectada de la anterior, y una textura más fina. Se ubica en las partes altas del cordón del cerro Limbo y al este del cerro Campana. Corresponden a un plateau de 50-75 m de potencia.

Es una secuencia constituida por andesitas y dacitas porfídicas, de grano fino, que, en sus niveles inferiores, presentan estructuras de fluidez y que, hacia el techo, exhiben una textura moteada (Tabla 1).

Sus afloramientos se disponen, en aparente concordancia, sobre las tobas de lapilli de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco, incorporando clastos de tobas en los niveles inferiores. Se considera que corresponden a la prolongación efusiva, hacia el oriente, de los domos de Sierra del Relincho, debido a su afinidad petrográfica y a la distribución y disposición de sus afloramientos.

En una andesita se obtuvo una edad K-Ar, en roca total, de $55,5 \pm 1,9$ Ma (Tabla 2).

Domos Dacíticos

Esta unidad corresponde a un conjunto de domos de composición dacítica emplazados a lo largo de dos fracturas mayores. Una de ellas es rectilínea (norte-sur), levemente curvada, entre los cerros La Isla y Campana (Fractura Peñafiel), la otra es semicircular y está ubicada al oeste y noreste de El Soldado (Fig. 5).

A la Unidad de Domos Dacíticos se asignan, también, diques y "stocks" de pequeña dimensión, que son equivalentes en cuanto a posición estratigráfica y petrografía. Además, se incluyen dacitas porfídicas de grano más grueso, que afloran al norte de Sierra del Relincho y que corresponderían a niveles de emplazamiento más profundo. Asimismo, se asignan a esta unidad los afloramientos de Cerro Relincho, que corresponden a brechas dacíticas, monomíticas, silicificadas, de posible origen hidrotermal.

Petrográficamente, los domos corresponden a dacitas fluidales, de textura porfídica, con masa fundamental hialopilitica y fenocristales de plagioclasa tipo andesina (An_{35-40}), anfíbolos tipo oxihornblenda y biotita. Los máficos, generalmente, tienen bordes de óxidos de Fe. La masa fundamental presenta, en forma intersticial, pecas de minerales opacos (Tabla 1).

Los Domos Dacíticos intruyen, localmente, a las dacitas de la Unidad Dacitas y Andesitas de Plateau y a las tobas de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco.

Dentro de esta unidad se ha observado, como rasgo común, un denso diaclasamiento (200 diaclasas/m) paralelo a los planos de fluidez y concéntricos a la estructura dómica. También es común el desarrollo de vidrio pelítico en el contacto con las coladas de la Unidad Dacitas y Andesitas de Plateau así como con las Tobas Cachinal-Guanaco. Este vidrio corresponde a una fase marginal de enfriamiento rápido, asociado al emplazamiento posiblemente subaéreo de estos cuerpos. A su vez, se han observado estos márgenes de enfriamiento en diques dacíticos de 2-3 m de ancho (Figs. 6a, b).

Las dataciones K-Ar (Tabla 2) indican una marcada diacronía para los diferentes domos de esta unidad, variando entre $60,2 \pm 1,6$ y $56,1 \pm 1,7$ Ma para aquéllos emplazados a lo largo de la fractura

Peñañiel y $53,0 \pm 1,4$ y $51,2 \pm 1,7$, para aquéllos asociados a la estructura anular del norte del área. Este fenómeno es igual al ya observado para las diferentes coladas de la Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau. Sin embargo, desde el punto de vista de la evolución geológica del área estudiada, ambas unidades deben ser consideradas sincrónicas como se confirma por las edades K-Ar. De esta forma se explica que manifestaciones subaéreas (Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau) de algunos de estos domos sean cortadas por otros domos de emplazamiento más joven.

Asociado al emplazamiento de los Domos Dacíticos se distingue una intensa actividad hidrotermal, que se manifiesta por la presencia de brechas hidrotermales próximas a campos de características paleofumarólicas, como el que se observa en la periferia este de los domos cerros 3.103 y 3.111 (Fig. 6a), y por la presencia de los yacimientos vetiformes del área. El desarrollo de vidrio esferulítico en bandas y la alteración argílica intensa, además de amígdalas rellenas por calcita de color marrón oscuro (con manganeso-hierro), son también evidencias de la actividad fumarólica.

Otro argumento para la sincroneidad de la actividad hidrotermal, con el emplazamiento de los Domos Dacíticos, son las edades K-Ar en minerales de alteración de las vetas del Distrito Cachinal de La Sierra ($59,2 \pm 1,4$ y $59,3 \pm 2,2$ Ma; Tabla 2).

Este conjunto de antecedentes apoya la hipótesis de una íntima relación genética entre el emplazamiento de los domos dacíticos y las vetas de plata de Cachinal de La Sierra. Se observó esta misma relación de campos paleofumarólicos-yacimientos metalíferos, en los sectores de El Soldado y de Cerro Campana, al norte y al sur del área, respectivamente.

Conglomerados y Areniscas Verdes

Corresponden a conglomerados verdosos de clastos subredondeados (<10 cm) de constituyentes volcánicos. Las areniscas son arcóscas, de color verde, constituidas por clastos de cuarzo, feldespatos y líticos volcánicos, en una matriz arcillosa.

Afloran en el sector nororiental de Sierra del Relincho, en el flanco occidental del sector de Cerro Islote (4 km al este, fuera del área de estudio) y al



FIG. 6. a. Domo Peñañiel, sectores más oscuros corresponden a vidrio perfitico; los claros, a alteración argílica de origen fumarólico.
b. Dique de dacitas intrusivas (Unidad Domos Dacíticos) cortando a la Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau. Se observa margen de enfriamiento.



sur de éste.

No afloran en el sector de Cachinal de La Sierra, y se observan en los pozos de exploración realizados en las proximidades del cementerio de esa localidad. Aquí están cubiertos por 10-15 m de depósitos aluviales y coluviales no consolidados.

Los Conglomerados y Areniscas Verdes corresponden a depósitos clásticos, que sobreyacen a las Tobas Cachinal-Guanaco, como relleno de cuencas endorréicas ubicadas entre sectores topográficamente elevados.

Cuello Andesítico

Un kilómetro al SSE de Cerro La Isla se observó una estructura circular, brechosa, de composición andesítica, interpretada como cuello volcánico (Fig. 5). Esta corta a las rocas de la Unidad Damos Dacíticos y a la Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau. La edad K-Ar obtenida en roca total dio $42,8 \pm 2,1$ Ma.

Pórfido Andesítico

En el sector noreste del Distrito El Guanaco se observó un pequeño afloramiento de pórfido andesítico, que representaría un cuerpo intrusivo subvolcánico (Fig. 5).

La roca es de color gris muy oscuro a marrón-violáceo-verdoso (40%) de plagioclasa y piroxeno, de 0,5 mm, en una masa fundamental pilotaxítica, con material ferruginoso intersticial. Los piroxenos se presentan alterados a clorita, calcita y óxidos de Fe, y las plagioclasas presentan alteración incipiente del mismo tipo.

Esta unidad aparece intruyendo a andesitas afañíticas fisibles, de color gris-violáceo oscuro, asignadas a la Unidad de Andesitas de Piroxeno y a tobas de lapilli alunitizadas y silicificadas de la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco. A su vez, el pórfido andesítico aloja a la veta Blanca Estela, por lo tanto, su emplazamiento es pre-mineralización.

MINERALIZACION

En el área estudiada, existen yacimientos vetiformes explotados por oro, plata y cobre, que presentan, además, mineralización subordinada de plomo y cinc. Los laboreos de explotación se concentran en los sectores conocidos como Mineral El Soldado (plata), del distrito homónimo, en el norte, Distrito Cachinal de La Sierra (plata), en el centro, y Distrito El Guanaco (oro-cobre), en el extremo sur del área. Vetas menores se encontraron al noreste de Cerro La Isla (Fig. 5) y al noroeste de El Guanaco, en los alrededores de Cerro Campana.

El sector El Guanaco se destaca de los demás distritos mineros, presentes en el área, por su prominencia morfológica, producto de la silicificación que acompaña a la mineralización, a diferencia de los otros dos distritos, donde la alteración hidrotermal y las vetas no presentan expresión superficial relevante.

DISTRITO EL SOLDADO

En este distrito, ubicado en la parte norte del área (Fig. 5), se reconocen a lo menos cinco vetas con mineralización polimetálica de Ag, Pb, Zn y Cu. La veta principal, explotada en la mina Juana, corresponde a una veta-falla de rumbo N10-25°E/75-85°NW, con 600 m de corrida y potencia varia-

ble entre 0,5 y 3,0 m. La mineralización se concentra en lentes o bolsanadas, a lo largo de la corrida, presentándose como vetillas, cemento y como clastos en la brecha de falla. Las leyes de la zona oxidada (explotada) son de 500 g/t Ag y 2-3 g/t Au (Boric *et al.*, inédito, 1984). No se dispone de datos de producción ni de reservas.

Los minerales presentes, en orden de abundancia, corresponden a cuarzo, esfalerita, galena argentífera, pirita, calcopirita, cerusita, pearceita, malaquita, atacamita, siderita y oro nativo.

En el Sector Noreste de Cerro La Isla (Fig. 7), que se incluye dentro del Distrito El Soldado, por su proximidad geográfica, existen por lo menos 13 vetas de cuarzo-hematita, con mineralización de Ag, Pb y Zn (SERNAGEOMIN/JICA/MMAJ, inédito, 1987). Las vetas no afloran, estando cubiertas por sedimentos no consolidados y han sido reconocidas en laboreos verticales de profundidad inferior a 50 m. La potencia de las vetas varían entre 0,25 y 1 m, excepcionalmente 2,50 m. No presentan un rumbo preferencial y, aparentemente, tienen una disposición radial con respecto al cerro La Isla. La mineralogía observada corresponde a cuarzo, hematita (especularita), limonita, esfalerita, galena, calcita, anglesita, calcopirita, pirita, cuprita, trazas de oro y de plata.

La roca encajadora corresponde a andesitas de piroxeno, asignadas a la unidad del mismo nombre, aunque en los desmontes de algunas labores se observó, también, microdiorita y conglomerados verdes de clastos andesíticos. La alteración de las rocas encajadoras es, en general, débil, y consiste en propilitización de carácter regional, silicificación, argilización y cloritización (SERNAGEOMIN/JICA/MMAJ, inédito, 1987).

DISTRITO CACHINAL DE LA SIERRA

Este distrito argentífero está ubicado en el centro del área estudiada, equidistante de los distritos El Soldado y El Guanaco. Su explotación comenzó en 1875 y se mantuvo ininterrumpidamente entre 1880 y 1930 (Kuntz, 1928). La producción entre 1920 y 1930 llegó a superar las 5 t mensuales de plata en barras (Greiner, inédito, 1978). Desde entonces, se ha explotado en forma esporádica.

La mineralización está emplazada en vetas relacionadas con fallas de orientación NNW-NW. Llaumett (inédito, 1980) reconoció 14 vetas, con dos rumbos preferentes, N10°W y N25-45°W, con mantos variables entre 70° y 85° al este (Fig. 7). Las potencias varían entre 1 y 2 m, llegando hasta 20 m en zonas de cruceros. La profundidad máxima reconocida alcanzaría a 320 m (Pique Prat), aunque muy pocas minas sobrepasan los 120-130 m, que corresponde al límite entre la zona de oxidación-enriquecimiento y la zona primaria.

Las corridas reconocidas de las distintas vetas varían entre 500 y 1.500 m, aunque estudios geofísicos y geoquímicos indican que podrían continuar por otros 1.000 m más (Llaumett, inédito, 1980). En ellas, la mineralización se concentra en bolsanadas de 100-200 m de largo y buzamiento casi vertical.

La ley de la zona primaria se desconoce y en la zona de enriquecimiento habría sido superior a 300 g/t Ag (Llaumett, inédito, 1980). Actualmente, se explotan leyes de 500-600 g/t, alcanzando a 2.500

g/t en algunos sectores (Piques Virginia 23 y Gamma 426) con leyes de oro inferiores a 3 g/t.

En los laboreos accesibles, se han reconocido tres tipos diferentes de cuerpos mineralizados:

- a. Fracturas mineralizadas con relleno y/o pátina de óxidos de Fe y Ag (Piques Virginia 30-31).
- b. Vetas de cuarzo macizo, localmente amatista, con sulfuros y óxidos de Ag, Fe, Pb, Zn y Cu (Pique Virginia 3).
- c. Brechas hidrotermales vetiformes, con clastos de roca encajadora silicificado-argilizado-sericitizados, cementados por cuarzo (amatista), localmente entrecrecido con adularia, fluorita y sulfuros de Ag, Fe, Pb, Zn y Cu (Piques Virginia 23 y Gamma 426).

Las rocas encajadoras de la mineralización corresponden, predominantemente, a tobas ignimbríticas de cristales, asignadas a la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco y, en forma local, a la Diorita Cachinal.

La alteración relacionada a la mineralización es de intensidad moderada y corresponde a una silicificación penetrativa, que ataca a los fragmentos y matriz. Los cristales de cuarzo preexistentes ("ojos de cuarzo") presentan anillos de sobrecrecimiento, y la matriz vítrea original ha sido reemplazada por un mosaico de cuarzo microcristalino. Los feldespatos presentan intensa sericitización, con escasa pirofilita y jarosita diseminada. La roca alterada está cruzada por numerosas vetillas (1-2 mm), con relleno de cuarzo "crustificado", entrecrecido con adularia microgranular y fluorita intersticial.

La mineralización se encuentra ubicada, preferentemente, en el cemento silíceo de las brechas y consiste en cúmulos irregulares (1-5 mm de diámetro), de color negruzco, en los cuales se reconocen sulfuros polimetálicos distribuidos según las siguientes asociaciones:

- a. Esfalerita, galena y calcopirita, con textura de depositación simultánea (bordes cóncavo-convexos). Tetrahedrita, freibergita y argentita se

FIG. 7. Mapa geológico, Distrito Cachinal de La Sierra. Restitución aerofotogramétrica, según SERNAGEOMIN-JICA-MMAJ, 1987, inédito). 1. Depósitos no consolidados de gravas, arenas y limos; 2. Dacitas fluidales con "ojos" de cuarzo, pertenecientes a la Unidad de Domos Dacíticos; 3. Tobas de lapilli y tobas soldadas con "ojos" de cuarzo, en sectores silicificados, pertenecientes a la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco; 4. Unidad de Lavas Andesíticas de Piroxeno; 5. Diorita de piroxeno con variaciones porfídicas que pertenecen a la Unidad Diorita Cachinal. 6. Vetas reconocidas según levantamiento de Llaumett (1980, inédito); 7. Trinchera de cateo; 8. Desmontes y piques antiguos; 9. Desmontes menores y pozos de exploración; 10. Piques en explotación; 11. Camino; 12. Cota; 13. Edad K-Ar de veta encajada en tobas (ver Tabla 2 y Figs 9, 10).

encuentran comúnmente en los márgenes de la galena.

- b. Calcopirita entrecrecida con galena, con inclusiones de polibasita, stromeyerita, stephanita y tetrahedrita con calcosina.
- c. Pirita con inclusiones de galena. La plata y el oro nativo se encuentran sólo en trazas.

En los niveles superiores de las vetas se observa una fuerte oxidación, encontrándose gran parte de la galena alterada a anglesita, y el resto de los sulfuros, limonitizados.

Las características de la alteración y mineralización observadas en el Distrito Cachinal de la Sierra permiten clasificar a este depósito dentro del tipo Adularia-Sericita, definido por Hayba *et al.* (1985).

DISTRITO EL GUANACO

El distrito aurífero-cuprífero El Guanaco está situado 15 km al sur del Distrito Cachinal de La Sierra y a 25 km de El Soldado. Fue descubierto en 1878 e intensamente explotado entre 1886 y 1928; posteriormente, ha sido trabajado en forma esporádica, en pequeña escala. La producción total se estimó en 30 t de oro fino (Boric *et al.*, inédito, 1984), desconociéndose la producción de cobre.

Los cuerpos mineralizados conocidos se emplazan en el sector de los "cerros islas" Guanaquito y Estrella (Fig. 8a), donde aflora una secuencia estratificada constituida, principalmente, por tobas líticas de lapilli, brechas tobáceas y tobas soldadas. En la base de esta secuencia, aparecen andesitas afaníticas fisibles, que también se intercalan entre las tobas, junto con andesitas porfídicas de piroxeno. El único cuerpo intrusivo observado se ubica en el sector noreste del distrito, y corresponde a un pórfido andesítico de piroxeno (Figs. 8a y b).

La secuencia estratificada forma un sinclinal cuyo eje, de orientación norte-sur, se ubicaría entre los cerros antes mencionados. El fracturamiento principal tiene dirección N70°E-N75°W, y es el que controla el emplazamiento de la mineralización. Localmente, se observan fallas post-mineralización de poca importancia, de rumbo N-S, NE-SW y NW-SE.

El área mineralizada tiene 4,5 km en sentido este-oeste por 1 km de ancho, y está afectada por una fuerte alteración hidrotermal de tipo silicificación, argilización avanzada y cloritización.

La mineralización metálica de El Guanaco se

asocia a zonas de silicificación intensa, desarrollada a lo largo de las fracturas (¿fallas?) de orientación N70°E-N75°W. Estas zonas de rocas silicificadas, que en parte incluyen cuerpos de sílice maciza, son de colores gris o rosado, claros; la sílice se presenta como cuarzo microcristalino o criptocristalino (tridimita-cristobalita), aunque también se observa calcedonia y ópalo relleno de pequeñas cavidades. Se pueden distinguir varias fases de silicificación, debidas al fracturamiento repetido y a la cementación de los clastos con sílice. Baritina en cristales gruesos, bien cristalizados (diámetro de 1-3 cm) acompaña comúnmente a la sílice. Alunita rosada, en parte natroalunita, en cúmulos bien cristalizados, aparece también en la matriz sílicea. Otros minerales, de escasa frecuencia en estas zonas, son: anhidrita, caolinita y fluorita. El contacto de las zonas silicificadas con las tobas encajadoras es, por lo general, bien definido, y está marcado, en ciertos lugares, por espejos de falla con pátina de hematita. En algunos sectores (Sector Huáscar), los cuerpos de sílice adquieren forma tabular concordante con la estratificación (mantos), mientras que, en profundidad, son vetiformes subverticales.

En torno a las zonas de silicificación intensa, se desarrolla una fuerte alteración argílica avanzada, en halos de ancho muy variable (5-200 m), con alunita rosada, reemplazando a feldespatos y en cúmulos de cristales aciculares de 1-2 cm, junto con caolinita, pirofilita y trazas de dickita. La matriz presenta una fuerte silicificación (cuarzo microcristalino) con caolinita intersticial. Los clastos muestran, en algunos casos, sólo silicificación y, en otros, reemplazo por alunita y baritina en cristales aciculares de hasta 0,5 mm. Los componentes líticos muestran "ojos" de cuarzo de hasta 2,0 mm, observándose, también, fragmentos de cuarzo primario, aislados en la matriz.

En los sectores donde las fracturas mineralizadas atraviesan capas andesíticas o pórfido andesítico (Veta Blanca Estela), la silicificación se restringe al cuerpo de la veta y a un estrecho halo con vetillas de cuarzo polidireccionales. Las rocas andesíticas presentan, además, cloritización generalizada de los ferromagnesianos, de distribución regional.

Dentro de las zonas de silicificación intensa, la mineralización se concentra en cuerpos vetiformes de rumbo preferencial N70-80°E y, en forma secundaria, de rumbo EW-N75°W, con manteos va-

riables entre 70°N y vertical. La potencia de estos cuerpos varía entre 0,5-2,0 m, pudiendo alcanzar hasta 50 m en zonas con impregnación de baja ley. Las corridas varían entre 200 y 600 m, con hábito lenticular y formación de "clavos" de hasta 50 m de diámetro.

La profundidad máxima que alcanzan las "vetas" se desconoce, habiendo sido explotadas intensamente, en forma artesanal, en sus 100-140 m superiores (excepcionalmente 300 m en Mina Estrella de Venus). Los primeros 50-70 m de profundidad corresponden a la zona de lixiviación (mena aurífera, Llaumett, inédito, 1979), donde se explotaron vetas y bolsonadas de 0,50-3,0 m de potencia, con 50-180 g/t Au. Entre los 50 y 120 m de profundidad, la mena varía a cuprífera, habiendo sido

explotada una zona de sulfuros supérgenos (calcosina y covelina) resultantes del reemplazo de enargita y piritita, en vetas de 1-2 m de potencia, con leyes sobre 5 % Cu, 0,5-5,0 g/t Au y sobre 20 g/t Ag. Bajo los 100 m de profundidad, se ubica la zona de sulfuros primarios consistente, fundamentalmente, en piritita, enargita, luzonita y calcopirita. Las leyes de esta zona fluctúan entre 0,5 y 2,0 g/t Au; 0,5-1,0% Cu y 10-20 g/t Ag (Llaumett, inédito, 1979).

Según las características de la alteración y mineralización descritas, el yacimiento El Guanaco puede ser clasificado dentro del tipo Acido-Sulfato, de Hayba *et al.* (1985) o Enargita-Oro, de Ashley (1982).

GEOCROLOGIA

En el área estudiada se efectuaron 26 determinaciones radiométricas K-Ar, realizadas en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. Los materiales utilizados fueron, en general, concentraciones puras (>90%) de minerales o, en caso contrario, concentraciones mixtas, válidas para dar una interpretación de la edad obtenida. Los resultados se indican en la tabla 2 y en el histograma de frecuencia de la figura 9. La ubicación de las muestras se observa en el mapa geológico simplificado de la figura 10.

La más antigua de las edades obtenidas en el área corresponde a la Diorita Cachinal. Considerando que se trata de una diorita de piroxeno, la datación se efectuó en dos muestras de plagioclasa. De los resultados obtenidos y expuestos en la tabla 2, la edad de $61,7 \pm 1,5$ corresponde a un concentrado de plagioclasas que presentan, microscópicamente, parches de feldespato potásico. La presencia de este reemplazo se observa, también, en el contenido alto y anómalo del %K total en peso presente en la plagioclasa. Sin embargo, por antecedentes petrográficos microscópicos, se interpreta que esta adición de K se pudo haber producido en los procesos neumatolíticos del enfriamiento de la diorita y no como una alteración potásica posterior, de origen hidrotermal. Por consiguiente, se considera como edad mínima, pero posiblemente cercana a la cristalización. Este valor, por otra parte, concuerda con las relaciones

estratigráficas observadas. La otra edad obtenida para la Diorita Cachinal fue de $55,8 \pm 3,5$ Ma (Fig. 10) en plagioclasa sericitizada, proveniente de la caja de una veta del sector sur del Distrito Cachinal de La Sierra. Esta edad correspondería al rejuvenecimiento de la plagioclasa producto de la alteración hidrotermal en el sector. Este último valor, como edad, es también observado en unidades más jóvenes que la diorita y que presentan una marcada alteración hidrotermal.

Las Lavas Andesíticas de Piroxeno, que según se estima presentan una relación genética con la diorita, tienen edades en roca total de $60,2 \pm 2,2$ y $60,7 \pm 2,1$ Ma (Tabla 1; Figs. 9, 10), que son interpretadas como de cristalización de las lavas, debido a que las rocas analizadas no presentan antecedentes de alteración ni rejuvenecimiento. Dicha edad sería concordante (Tabla 2; Fig. 9) con la de emplazamiento de la Diorita Cachinal, y, en consecuencia, esta última puede ser considerada como un cuerpo subvolcánico asociado a estas rocas.

La Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco tiene como edades más antiguas $60,4 \pm 1,6$ y $60,7 \pm 1,7$ Ma en biotita. El primer análisis corresponde a un nivel de tobas de cristales con biotita y el segundo, a un vitrófiro basal con cuarzo, anfíbola, plagioclasa y biotita, del cerro Limbo (Fig. 10). En consecuencia, se interpretan como edades de cristalización que, para este tipo de roca corresponden a su depositación. Sin embargo, las edades en sericita

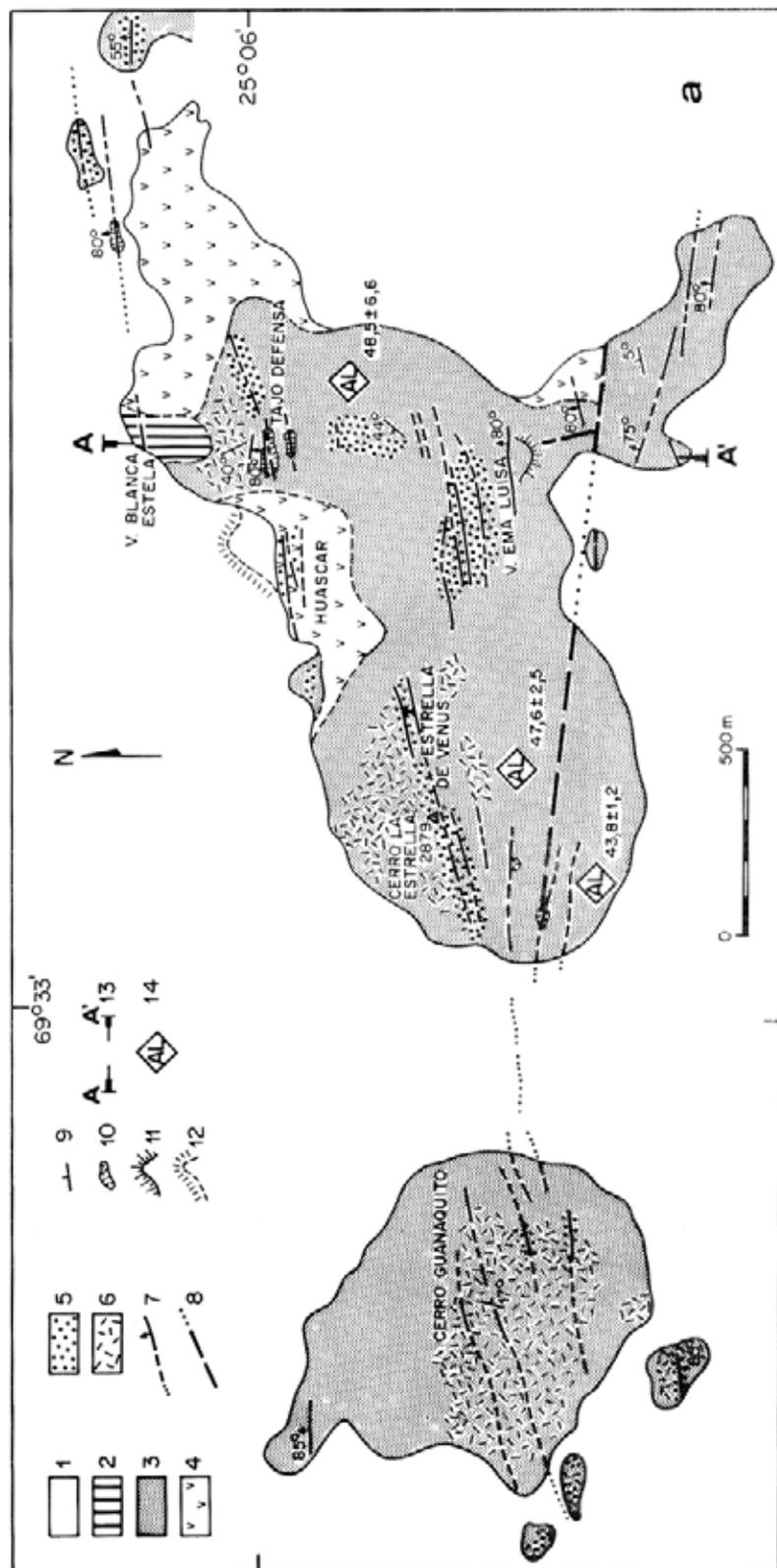
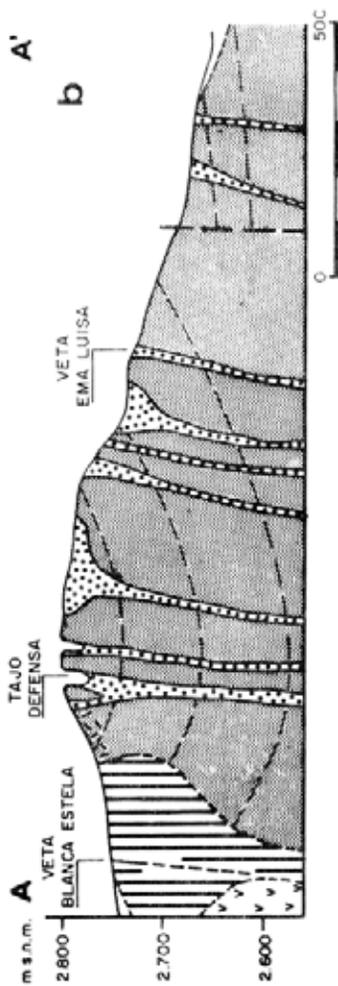


FIG. 8. a. Mapa geológico del distrito El Guanaco. 1. Depósitos de gravas y arenas no consolidadas; 2. Pórfido andesítico de piroxeno, pre-mineralización; 3. Tobas líticas de lapilli, brechas tobáceas y tobas soldadas, con intercalaciones de andesitas atáníticas, fisibles; 4. Lavas andesíticas atáníticas, fisibles, y andesitas porfídicas de piroxeno; 5. Silificación intensa, incluye cuerpos macizos de sílice microcristalina; 6. Alteración argílica avanzada, con cuarzo-alunita-caolinita-pirofilita; 7. Vetas, según levantamiento de Egaña (inédito, 1978); 8. Fallas; 9. Rumbo y manto de la estratificación; 10. Tajos de explotación; 11. Desmontes; 12. Relaves; 13. Perfil geológico. b. Perfil a lo largo de la línea A-A': Simbología según a.



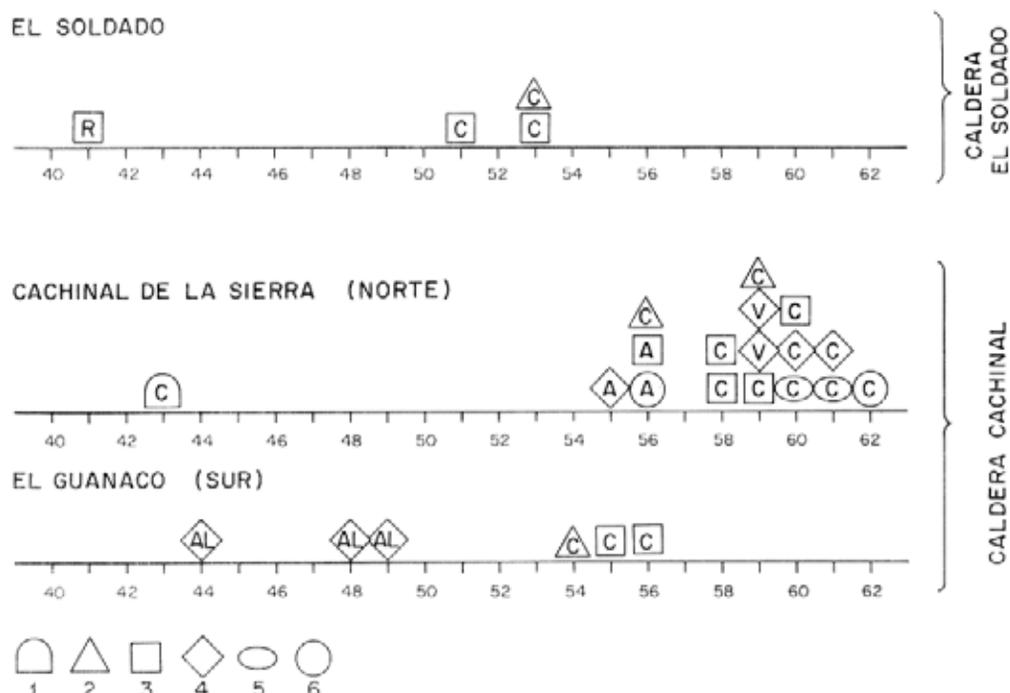


FIG. 9. Histograma de frecuencia de edades K-Ar realizadas en muestras de las calderas El Soldado y Cachinal. Esta última, dividida en dos sectores: Cachinal de La Sierra (norte) y El Guanaco (sur). Símbolos representan la unidad a la que se asigna la muestra datada (ver Tabla 2). 1. Cuello andesítico, sector Cerro La Isla; 2. Dacitas y Andesitas de Plateau; 3. Domos dacíticos; 4. Tobas Cachinal-Guanaco; 5. Andesitas de piroxeno; 6. Diorita Cachinal; R. Edad mínima por pérdida de Ar radiogénico; C. Edad de cristalización; A. Edad de alteración hidrotermal; V. Edad en vetas; AL. Edad en alunitas.

provenientes de la caja de la veta Flor de Chile (Pique Gamma 426) ($59,2 \pm 1,4$ Ma; Tabla 2) y en un agregado de cuarzo-sericita de un clasto en la veta del Pique Virginia 23 ($59,3 \pm 2,2$ Ma; Tabla 2), en Cachinal de La Sierra (Figs. 7, 10), evidencian un rejuvenecimiento de la toba por actividad hidrotermal, que se habría desarrollado contemporáneamente con el emplazamiento de los domos dacíticos del sector. Por otra parte, la edad de $55,4 \pm 1,9$ Ma en una toba recolectada en superficie, alterada hidrotermalmente, pero lejos (>15 m) de una veta (Fig. 10), sería, posiblemente, la edad de la última actividad térmica del sector, siendo equivalente a la edad de rejuvenecimiento presentada por la plagioclasa sericitizada de la Diorita Cachinal. Esta edad podría tener relación con la actividad solfatárica y última del sector, o con posibles alzamientos tardíos.

En general, las edades de la **Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau** ($58,5 \pm 1,6$; $55,5 \pm 1,9$; $54,4 \pm 2,5$ y $52,6 \pm 1,9$ Ma; Tabla 2) se interpretan como de cristalización. Los materiales, roca total y biotita, presentan contenidos estándares de

potasio total, lo que excluye la posibilidad de alteración potásica, además de que, petrográficamente, tampoco se observa este tipo de alteración. En consecuencia, las diferencias entre los valores de edades obtenidos para esta unidad se explican como manifestaciones locales de emanaciones de las lavas, a diferentes tiempos y, posiblemente, relacionadas con los domos dacíticos sincrónicos por cada localidad.

Las edades de los **Domos Dacíticos** son consideradas, principalmente, de cristalización. Sólo en el cerro Peñafiel se obtuvo una edad en roca total de $57,5 \pm 2,3$ Ma y $56,4 \pm 1,8$ Ma (Tabla 2; Fig. 10) en plagioclasa de la misma muestra, analizada en roca total. Esta última edad puede reflejar la temperatura de cierre de la plagioclasa (temperatura a la cual comienza a entramparse el ^{40}Ar radiogénico), ya sea por término de la actividad solfatárica local o por alzamiento final del domo, y la primera como una edad mínima más cercana a la cristalización, puesto que refleja un promedio de edades parciales de los diferentes constituyentes de la roca total. Sin embargo, analíticamente, ambas eda-

TABLA 2. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar DE MUESTRAS RECOLECTADAS EN LOS DISTRITOS EL GUANACO, CACHINAL DE LA SIERRA Y EL SOLDADO

No. Muestra	No. Analisis	%K Total en Peso	⁴⁰ Ar(n/g (STP))	% ⁴⁰ Ar Atm.	Edad Analítica y Error 2 σ (Edad Geológica)	Material Datado y Ubicación	Observaciones
Unidad Diorita Cachinal							
BSD-9T	P394/87	5,459	13,311	16	61,7 \pm 1,5 (62 \pm 2)	Plagioclasa con parchas K-feldespatos	Roca fresca; edad cercana a cristalización
BAP-40	H321/86	2,150	4,733	74	55,8 \pm 3,5 (56 \pm 4)	Plagioclasa con alteración a sericita	Edad de alteración
Unidad Andesitas de Piroxeno							
BSD-1T	P387/87	1,459	3,505	27	60,7 \pm 2,1 (61 \pm 2)	Roca total en andesita afanítica	Edad de cristalización
BAP-148D	H490/87	2,032	4,835	36	60,2 \pm 2,2 (60 \pm 2)	Roca total en andesita afanítica	Edad de cristalización
Unidad de Tobsas Cachinal-Guanaco							
BAP-183	P459/87	6,321	15,178	35	60,7 \pm 1,7 (61 \pm 2)	Botillas en tobas de cristales	Edad de cristalización
BAP-178	P460/87	6,876	16,417	26	60,4 \pm 1,6 (60 \pm 2)	Botillas en vitrofiro basal de ignimbrita	Edad de cristalización
BLC-N3-10	P423/87	2,305	5,406	40	58,3 \pm 2,2 (59 \pm 2)	Agregado sericita-cuarzo de cistoso de vela (Pique 23)	Edad de alteración (sericita)
BAP-74	P250/86	8,040	18,828	8	59,3 \pm 2,2 (59 \pm 2)	"Fiammes" de toba sericizada en vela (Pique 426)	Edad de alteración (sericita)
BSD-20	P425/87	4,186	9,159	40	55,4 \pm 1,9 (55 \pm 2)	Roca total sin cuarzo en toba alterada	Edad de alteración
BSD-219D	H572/87	0,815	1,557	82	48,5 \pm 6,6 (49 \pm 7)	Alumina (neofalunita) de El Guanaco	Edad de alteración (alumina)
BSD-220D	P452/87	1,570	2,942	82	47,8 \pm 1,2 (48 \pm 3)	Alumina (neofalunita?) de El Guanaco	Edad de alteración (alumina)
M-171	P317/86	5,751	9,931	53	43,8 \pm 1,2 (44 \pm 1)	Alumina ¿velilla supergénica?	Edad de alteración ¿supergénica?
31							
Unidad de Dacitas-Andesitas de Plateau							
BAP-109	H493/87	6,702	15,492	21	58,5 \pm 1,6 (59 \pm 2)	Botillas de dacita, Sector Cachinal de La Sierra	Edad de cristalización
BAP-181	H692/88	3,056	6,700	16	55,5 \pm 1,9 (56 \pm 2)	Roca total, Sector Cerro Limbo	Edad de cristalización
BSD-221	P427/87	3,437	7,383	52	54,4 \pm 2,5 (54 \pm 3)	Roca total, dacita Sector El Guanaco, Cerro Campana	Edad de cristalización
SD-229	P428/87	2,032	4,213	46	52,6 \pm 1,9 (53 \pm 2)	Roca total, dacita Sector El Soldado	Edad de cristalización
Unidad Domo Dacíticos							
BSD-226	P533/88	6,714	15,989	25	60,2 \pm 1,6 (60 \pm 2)	Botilla, Domo Cerro 2,953	Edad de cristalización
BAP-1	P189/86	3,374	7,901	36	59,2 \pm 2,0 (59 \pm 2)	Roca total, Domo La Lisa	Edad de cristalización
BAP-191	P553/88	5,978	13,776	35	58,3 \pm 1,6 (58 \pm 2)	Botilla, Domo Cerro 3,004	Edad de cristalización
BAP-11T	P190/86	2,876	6,531	54	57,5 \pm 2,3 (58 \pm 2)	Roca total, Domo Peñafiel	Edad de cristalización
BAP-11T	P189/86	3,405	7,588	11	56,4 \pm 1,8 (56 \pm 2)	Plagioclasa de la misma muestra anterior	Edad mínima
BAP-190	P463/87	6,713	14,874	46	56,1 \pm 1,7 (56 \pm 2)	Botilla de margen vitrofiro Cerro 3,004	Edad de cristalización
BSD-222	H591/87	6,810	14,719	17	54,8 \pm 1,4 (55 \pm 1)	Botilla Domo Campana	Edad de cristalización
BAP-115D	P331/86	6,891	14,402	21	53,0 \pm 1,4 (53 \pm 1)	Botilla de margen vitrofiro de sill	Edad de cristalización
SAP-8T	H335/86	6,149	12,423	51	51,2 \pm 1,7 (51 \pm 2)	Botilla Domo Sector El Soldado	Edad de cristalización
SAP-8T	H339/86	2,210	3,577	62	41,2 \pm 2,2 (41 \pm 2)	Vidrio alterado	Edad de alteración o mínima
Cuello Andesítico							
BAP-149D	H434/86	1,949	3,317	63	43,2 \pm 2,1 (43 \pm 2)	Roca total	Edad de cristalización
BAP-149D	H455/87		3,257	64	42,5 \pm 2,2 (41 \pm 2)	Repetición análisis de argón	

Nota: Los análisis K-Ar fueron realizados en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile (Pug. 1982). El Volumen de ⁴⁰Ar radiométrico fue determinado por el método estándar de dilución isotópica y espectrómetro de masa AEI MS-10S. El K fue determinado por triplicado, usando la técnica de absorción atómica, por emisión. Los errores son considerados a un nivel de confiabilidad de 2 σ . Las constantes son $\lambda_K = 0,581 \times 10^{10} a^{-1}$, $\lambda_A = 4,85 \times 10^{10} a^{-1}$, $^{40}K/^{39}K$ total = 0,01167%.

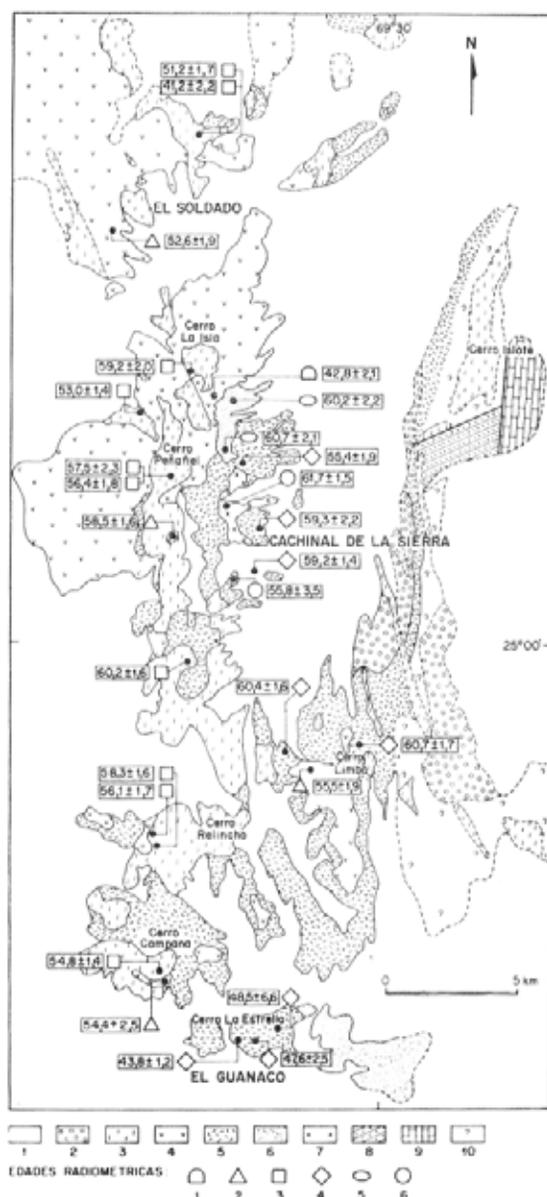


FIG. 10. Mapa geológico simplificado, con la distribución de las edades radiométricas K-Ar, asignadas a las principales unidades de rocas. 1. Depósitos de gravas y arenas no consolidadas; 2. Unidad de Conglomerados y Areniscas Verdes; 3. Unidad de Domos Dacíticos; 4. Unidad Dacitas y Andesitas de Plateau y Andesitas Cerro Limbo; 5. Unidad Tobas Cachinal-Guanaco; 6. Unidad Andesitas de Piroxeno; 7. Diorita Cachinal; 8. Areniscas de la Formación Santa Ana; 9. Areniscas calcáreas y calizas de la Formación El Profeta; 10. Rocas volcánicas indiferenciadas. Edades radiométricas con símbolos según Fig. 9.

des son concordantes entre sí. Igual situación se plantea para uno de los domos del sector de El Soldado, donde el análisis en roca total (fundamentalmente vidrio) entregó $41,2 \pm 2,2$ Ma, siendo que en biotitas separadas de la misma muestra, dio $51,2 \pm 1,7$ Ma. Debido a que, analíticamente, estas edades son discordantes, la diferencia puede ser atribuida a que la temperatura de cierre de la biotita ($>250^{\circ}\text{C}$) es mayor que la del vidrio, o a que los procesos de desvitrificación de este último (relativamente escasos al microscopio) permitieron el escape del ^{40}Ar radiométrico rejuveneciendo, en consecuencia, la edad. En general, las dacitas de esta unidad, datadas en roca total o en biotita, entregaron edades concordantes entre sí y con su posición estratigráfica, por consiguiente son interpretadas como cercanas a la edad de cristalización.

Edades K-Ar obtenidas en alunitas del sector El Guanaco dieron $48,5 \pm 6,6$; $47,6 \pm 2,5$; $43,8 \pm 1,2$ Ma (Figs. 8a, 10; Tabla 2). Considerando estos valores como la edad de formación de las alunitas es posible observar dos episodios generadores de ellas (Fig. 9). El primero de éstos, entre 49 y 48 Ma, que se caracteriza por alunitas con bajísimos contenidos de potasio total; lo que indicaría la presencia de natroalunita. A su vez, este tipo de alunita pobre en K se observa siempre entrecrecida con sílice producto de la fuerte silicificación ocurrida en el sector. Esto podría ser, también, un factor de la disminución del K en los concentrados de alunita analizadas con impurezas de cuarzo. Los difractogramas de rayos-X de las mismas muestras datadas indican la presencia de alunita y cuarzo muy abundante y natroalunita subordinada. El segundo episodio estaría representado por la muestra que dio una edad de 44 Ma (Fig. 9; Tabla 2) y corresponde a una vetilla de 1,5 cm de potencia del mismo sector en la que es notable el mayor contenido de K total. Estos antecedentes podrían evidenciar la presencia de dos eventos de precipitación de alunita, con características químicas y forma de precipitación diferentes, pudiendo ser el más antiguo de carácter hipógeno, asociado con sílice y el segundo, supérgeno. Aunque no se descarta la posibilidad de que ambos tengan un origen supérgeno, debido a la diferencia de tiempo (6 Ma) entre la cristalización de la roca huésped y la alteración.

EVOLUCION MAGMATICA Y DEPOSITOS MINERALES

Los antecedentes geológicos, estratigráficos y cronológicos expuestos, permiten vincular la actividad magmática, efusiva e intrusiva, del área estudiada con el desarrollo de un sistema de dos calderas resurgentes anidadas (Figs. 11, 12), de acuerdo con el modelo de Smith y Bailey (1968). Las principales etapas de la evolución de este tipo de estructuras volcánicas se reconocen en las rocas expuestas entre los sectores de El Guanaco y El Soldado. Debido a la gran dimensión de estas estructuras, la zona de estudio (Fig. 5) sólo incluye el margen occidental de la caldera Cachinal y el margen sur de la caldera El Soldado. La figura 12 corresponde a la reproducción de una imagen Landsat, donde se aprecian las dimensiones de las estructuras descritas.

CALDERA CACHINAL

En el sector de Cachinal de La Sierra se distingue un alineamiento NNE de domos dacíticos, que, de norte a sur, configuran los cerros La Isla, Peñafiel, 3.103, 3.111, 2.953, 3.004 y Cerro Campana. A esta estructura se la denomina Fractura Peñafiel y correspondería a una zona de fracturamiento anular (flanco occidental) de una probable caldera volcánica de más de 30 km de diámetro (Caldera Cachinal), cuyo margen oriental no ha sido reconocido o no presentó actividad. La Fractura Peñafiel está truncada en su extremo norte por una estructura semianular que configura la Caldera El Soldado y, hacia el sur, la trunca un lineamiento N75°E (Sector El Guanaco) identificado por Tidy (1986) (Fig. 5).

La actividad magmática puntual y localizada de la primera fase de evolución de la Caldera Cachinal estaría representada por las efusiones de las Andesitas de Piroxeno, asociadas a la Diorita Cachinal, esta última como un equivalente subvolcánico de las lavas. Dicha actividad tuvo lugar entre los 61-62 Ma. Contemporáneamente a los últimos episodios andesíticos, comienzan las efusiones de tobas de lapilli e ignimbritas, representadas por la Unidad de Tobas Cachinal-Guanaco, que se depositaron tanto al este como al oeste de la Fractura Peñafiel, estimándose un volumen mayor que 180 km³ de material efusivo. Como consecuencia de este hecho se habría producido el colapso de la caldera (Etapa III de Smith y Bailey, 1968) a lo largo de fracturas anulares tales como la Fractura Pe-

ñafiel. Al este ella se desarrolló el domo resurgente, cuyos afloramientos se extienden desde Cerro Islote hacia el sur, hasta la latitud de El Guanaco (Fig. 11). La resurgencia del domo está representada por el alzamiento y combamiento de este sector, seguido por la intrusión de lacolitos y diques dacíticos así como de diques microdioríticos (Fig. 5). Posteriormente, se habría desarrollado el fallamiento en bloques y erosión, dejando expuesto el basamento de la caldera (rocas de la Formación Santa Ana y El Profeta; Fig. 5), en el flanco sur-oriental de Cerro Islote.

El colapso de la caldera no fue sincrónico a lo largo de la Fractura Peñafiel produciéndose, posiblemente, primero un hundimiento en la parte norte y avanzando hacia el sur como una falla tipo tijera. Esto se demuestra por la diacronía del emplazamiento de los domos dacíticos (Domo Cerro La Isla, 59 Ma y Cerro Campana, 55 Ma; Tabla 2; Fig. 10), emplazados a lo largo de esta fractura, y por la morfología del sector; en la zona de los cerros La Isla y Peñafiel, los domos dacíticos están emplazados en un sector de quiebre del relieve, con cotas de 3.000 m s.n.m. hacia el oeste y de 2.650-2.700 m s.n.m. al este (lado deprimido). En cambio, en el sector de los domos Cerro Campana y Cerro 3.004, las cotas tanto al oriente como al occidente de ellos bordean los 2.900 m s.n.m. y, en consecuencia, no se aprecia un salto abrupto en el relieve, entre el lado este y el oeste.

Los depósitos de conglomerados y areniscas verdes productos de la erosión de las partes altas, que habrían correspondido, por el este, al sector combado del domo resurgente y por el oeste a la cadena de domos dacíticos emplazados en la Fractura Peñafiel, representarían la sedimentación intracaldera (Etapa IV, Smith y Bailey, 1968).

Finalmente, la actividad hidrotermal se habría producido al momento del emplazamiento de los domos dacíticos, como lo evidencian las edades de las vetas en Cachinal de La Sierra (59 Ma) y de la alunita de El Guanaco (49 Ma), y sus relaciones estratigráficas. Esta actividad hidrotermal se manifiesta por el desarrollo de los depósitos epitermales de metales preciosos, los cuales, según su posición espacial dentro de la caldera y los distintos distritos del área, tienen características diferentes. Así, en Cachinal de La Sierra, se reconocen depósitos del tipo Adularia-Sericita (Hayba *et al.*, 1985). El Guanaco, en cambio, correspondería al ti-

po Acido-Sulfato con enargita, evidenciando condiciones físico-químicas diferentes en ambos sectores. Por otra parte, estos antecedentes estarían confirmando las diferencias evolutivas de la caldera entre un sector y el otro.

El segmento de caldera descrito anteriormente se encuentra truncado hacia el norte por la Caldera El Soldado, cuyo desarrollo comenzó, aproximadamente, 7 Ma después del comienzo de la anterior. El extremo sur de la Caldera Cachinal está truncado por una estructura de rumbo ENE que controla las vetas del Distrito El Guanaco. Por otra parte, las vetas del Distrito Cachinal de La Sierra estarían controladas por fracturas paralelas al margen de la fractura Peñafiel.

Si bien en el área de estudio es posible identificar todas las unidades de rocas con aquellos productos de la evolución de una caldera, no se descarta la posibilidad de que la fractura Peñafiel sea sólo una fisura cóncava al oeste con actividad volcánica, con productos y evolución similares a los de una caldera. Este tipo de caldera, con un solo margen activo, se denomina caldera tipo bisagra (Druitt y Sparks, 1984).

CALDERA EL SOLDADO

En el extremo norte del segmento oeste de la Caldera Cachinal, se observa otra estructura anular (Fig. 11), cuyas características se pueden también enmarcar dentro del modelo de calderas resurgentes de Smith y Bailey (1968) y que, en este trabajo, se denomina Caldera El Soldado. Presenta un diámetro aproximado de 10 km. En el sector nor-oriental está truncada por la quebrada El Profeta, la que corresponde a una estructura regional de rumbo noroeste. Se caracteriza por el emplazamiento de domos dacíticos alineados según la estructura anular que la define. En el mapa de la figura 5 se representan las rocas del margen sur, con mayor detalle, donde se ubica el yacimiento El Soldado.

Las tobas ignimbríticas que afloran en el sector de El Soldado, si bien para efectos cartográficos se incluyeron en la Unidad de Tobas de Cachinal-Guanaco, corresponderían a las efusiones de esta otra caldera, aunque no se descarta la posibilidad de que los flujos inferiores correspondan a efusiones de la Caldera Cachinal. En el presente trabajo, no se logró una edad radiométrica para esta unidad, ni una definición de la proveniencia de estas

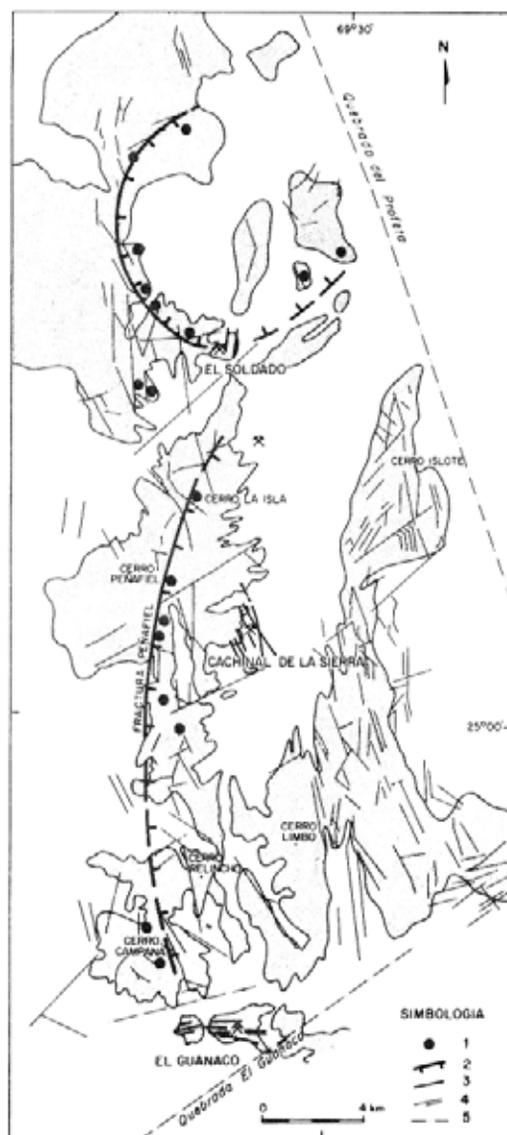


FIG. 11. Mapa fotogeológico de estructuras y lineamientos. 1. Domos dacíticos; 2. Margen de caldera; 3. Vetas; 4. Fotolineamientos y fallas observadas en terreno; 5. Lineamientos de imagen Landsat.

rocas. Sin embargo, se supone que las tobas asociadas a esta caldera tendrían una menor distribución areal debido al menor tamaño de la caldera.

Las relaciones estratigráficas mencionadas para las unidades de roca del sector de El Soldado, son equivalentes a las observadas y descritas para la Caldera Cachinal. Sin embargo, las edades radiométricas K-Ar de las unidades de este sector



FIG. 12. Sector de imagen Landsat donde se aprecian las estructuras circulares mayores (calderas) y los lineamientos.

son más jóvenes (Tabla 2; Fig. 9). Así es como una edad obtenida para la Unidad de Dacitas y Andesitas de Plateau en el sector, en roca total, fue de $52,6 \pm 1,9$ Ma y un domo dacítico que se emplaza a lo largo de la estructura anular dio una edad de cristalización de $51,2 \pm 1,7$ Ma. Estas edades permiten estimar que la Caldera El Soldado tuvo un inicio a los 53 Ma, con una actividad que duró, por lo menos, hasta los 51 Ma.

Por otra parte, en el centro de la Caldera El Sol-

gado, afloran lavas andesíticas y un cuerpo hipabisal elongado en sentido norte-sur (Marinovic, común verbal) que podrían corresponder al domo resurgente de esta caldera. Sin embargo, no se han reconocido aún, en detalle, las características de este domo.

La mineralización asociada a la Caldera El Soldado se emplaza en vetas de distribución radial con respecto al borde de la caldera.

CONCLUSIONES

- Los yacimientos de El Soldado, Cachinal de La Sierra y El Guanaco se habrían formado asociados a un complejo de dos calderas volcánicas anidadas, desarrolladas durante el Paleoceno-Eoceno Inferior (Caldera Cachinal y Caldera El Soldado). Estas calderas tienen dimensiones distintas y evolucionaron en tiempos diferentes y consecutivos. La Caldera Cachinal es una macroestructura (>30 km de diámetro) del tipo bisagra, que habría comenzado su actividad efusiva a los 60-61 Ma y concluido con el desarrollo del domo resurgente y el emplazamiento de domos dacíticos en el margen de ella, entre los 59 y 55 Ma. La etapa de colapso del piso de la caldera habría comenzado en el extremo norte, a los 58-59 Ma, terminando a los 55-56 Ma, en el sector sur, donde este colapso fue de magnitud más restringida. Con posterioridad a este evento, en el sector norte de la Caldera Cachinal, se emplazó la Caldera El Soldado, de aproximadamente 10 km de diámetro, cuya actividad ígnea habría comenzado a los 53 Ma y concluido, posiblemente, a los 51 Ma.
- Los depósitos minerales presentes en el área están asociados, genéticamente, al desarrollo de las estructuras volcánicas tipo calderas descritas anteriormente. Los depósitos son vetiformes, con mineralización económica de metales preciosos, y presentan un marcado control estructural con las calderas Cachinal y El Soldado.
- La mineralización de oro y plata se presenta en

las zonas de oxidación-enriquecimiento, y la mineralización polimetálica de sulfuros y sulfosales en las zonas primarias. Los depósitos presentan una asociación mineralógica de tipo epitermal, correspondiendo la de El Guanaco a una asociación tipo Enargita-Oro ó Acido-Sulfato y la de Cachinal de La Sierra al tipo Adularia-Sericita. El yacimiento El Soldado, del cual se cuenta con menor información, correspondería, también, a esta última clase. Las asociaciones mineralógicas y las edades de estos minerales permiten suponer que los tres distritos fueron originados por sistemas hidrotermales independientes y asincrónicos, correspondiendo una edad de 59 Ma para Cachinal de La Sierra y 49 Ma para El Guanaco. Para el yacimiento El Soldado, si bien no se cuenta con edades de minerales de alteración, se puede suponer una edad de formación entre 53 y 51 Ma, dada su asociación espacial con la caldera El Soldado.

- Los antecedentes mineralógicos, evolutivos y morfológicos expuestos, permiten suponer que el nivel de erosión sería más profundo en el Distrito El Soldado, con asociaciones mineralógicas que representan la zona de metales base, con plata y algo de oro; de nivel intermedio en el Distrito Cachinal de La Sierra, con mineralización fundamentalmente de plata, y de nivel más superficial en el Distrito El Guanaco, con oro en los niveles superiores y cobre en profundidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo logístico del Proyecto de Cooperación Técnica entre el SERNA-GEOMIN-JICA-MMAJ, 1985-87, quienes, además,

permitieron el uso de la información inédita.

Se agradece la colaboración de los geólogos Carlos Portigliati y Yuya Furukawa, por la coordina-

ción con el equipo japonés y su contribución en los trabajos de terreno.

Se agradece, también, a las compañías que operan en la zona, en particular a la Compañía Minera Chatal (Sr. Rubén Araneda), al industrial minero Sr. José Zazzali, a la Compañía Minera Soledad (Sr. Luis Vicencio) y a la Empresa Minera Eulogio Gordo y Cía., por las facilidades logísticas proporciona-

das y por permitir el acceso a sus faenas mineras.

Se agradece, a su vez, la revisión crítica de este trabajo efectuada por los colegas F. Franquesa, F. Henríquez y C.F. Ramírez, quienes mejoraron la última versión.

Este trabajo es una contribución al Proyecto 249 del PICG denominado Magmatismo Andino.

REFERENCIAS

- Ashley, R.P. 1982. Occurrence model for enargite-gold deposits. In *Characteristics of mineral deposit occurrence* (Erickson, R.L.; editor). U.S. Geological Survey, Open-File Report, No. 82-795, p. 126-129.
- Coira, B.; Davidson, J.; Mpodozis, C.; Ramos, V. 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of Northern Argentina and Chile. *Earth Sciences Review*, Vol. 18, p. 303-332.
- Druitt, T.H.; Sparks, R.S.J. 1984. Dynamics of caldera collapse in silicic volcanic centres. *Nature*, Vol. 310, p. 679-681.
- Hayba, D.O.; Bethke, P.M.; Heald, P.; Foley, N.K. 1985. Geologic, mineralogic and geochemical characteristics of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits. In *Geology and Geochemistry of epithermal systems* (Berger, B.R.; Bethke, P.M.; editors). *Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, Vol. 2, p. 129-167.
- Jordan, T.E.; Isacks B.L.; Allmendinger, R.W.; Brewer, J.A.; Ramos, V.A.; Ando, C.J. 1983. Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 94, No. 1, p. 341-361.
- Kuntz, J. 1928. Monografía minera de la Provincia de Antofagasta. *Sociedad Nacional de Minería (Chile)*, 77 p. Santiago.
- Mortimer, C. 1973. The Cenozoic history of the Southern Atacama Desert, Chile. *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 129, Part 5, p. 505-526.
- Naranjo, J.A.; Puig, A. 1984. Hojas Taltal y Chañaral. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, Nos. 62 y 63, 140 p.
- Puig, A. 1982. Instrucciones para obtención de muestras para estudio geocronológico, método K-Ar. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Miscelánea*, No. 1, 6 p.
- Smith, L.R.; Bailey, R.A. 1968. Resurgent cauldrons. *Geological Society of America, Memoir*, No. 116, p. 613-662.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Review*, Vol. 12, No. 1, p. 1-33.
- Tidy, R. 1986. Estudio geológico estructural basado en imágenes LANDSAT de Chile, entre los paralelos 18° y 35°S. In *Geología y recursos minerales de Chile* (Frutos, J.; Oyarzún, R.; Pincheira, M.; editores). *Editorial de la Universidad de Concepción*, Vol. 1, p. 135-202.