

MINERALOGIA Y GENESIS DEL YACIMIENTO DE LAPISLAZULI FLOR DE LOS ANDES, COQUIMBO, NORTE DE CHILE

LUCIA CUITIÑO G.

Servicio Nacional de Geología y Minería. Casilla 10465. Santiago, Chile.

RESUMEN

El yacimiento de lapislázuli Flor de los Andes es el único, de esta piedra semipreciosa, conocido en el país. Se ubica en la Alta Cordillera de Ovalle, en la zona externa de una aureola de metamorfismo de contacto, desarrollada en un plutón monzogranítico de la Unidad Río Las Cuevas (Oligoceno), en las calizas neocomianas de la Formación Tascadero. En esta aureola se reconocen tres zonas mineralógicas: I. Zona de mármoles con wollastonita; II. Zona de skarn con andradita-grossularita; III. Zona de roca corneana con hedenbergita. Las condiciones físicas para este metamorfismo se estiman en un rango de temperatura de 500-550°C, una presión total de 1,5 kb y relación de presión de CO₂ de 0,1.

El yacimiento de lapislázuli se encuentra en la Zona I de esta aureola de metamorfismo; se trata de una roca constituida por lazurita, con cantidades subordinadas de haüyna, wollastonita, diópsido, escapolita, calcita y trazas de afghanita, tremolita, allanita, pirlita, pirrotina, arsenopirlita y calcopirlita. La lazurita es el mineral que otorga su color azul característico al lapislázuli.

La arista de la celda-unidad de la lazurita se determinó en $9,08 \pm 0,01\text{Å}$, y la fórmula estructural es $([\text{Na}_{1,505}, \text{K}_{0,023}, \text{Ca}_{1,226}] \text{Al}_{5,455}, \text{Si}_{6,143} \{ \text{SO}_3, \text{S}_x\text{Cl}_{1-x} \})$.

La génesis del lapislázuli, en el yacimiento Flor de los Andes, habría ocurrido en dos etapas:

- Metamorfismo de contacto (24 Ma), durante el cual se formaron calcosilicatos y haüyna, en los sectores de las calizas con concentraciones altas de sodio y aluminio.
- Alteración hidrotermal (13-9 Ma), durante la cual se introdujo el azufre en las moléculas de haüyna, dando su origen a la lazurita y, por lo tanto, al lapislázuli.

Los depósitos de lapislázuli tienen génesis diferentes. La mayoría de ellos están asociados con calizas precámbricas evaporíticas, sujetas a metamorfismo regional. El depósito chileno, en cambio, está relacionado con calizas mesozoicas intruidas por un plutón monzogranítico terciario.

Estas diferentes génesis requieren condiciones físico-químicas muy particulares, que no se presentan bajo una sola condición geológica en el mundo.

ABSTRACT

The Flor de los Andes mine is the only lapislazuli deposit known in Chile. It is located in the Andean Range of the Coquimbo Region, in the outer zone of a contact metamorphic aureole, developed by the intrusion of a monzogranite pluton (Unidad Río Las Cuevas, Oligocene) in the limestones of the Río Tascadero Formation (Neocomian). This aureole is divided into three mineralogical zones: 1. Wollastonite marbles; II. Andradite-grossularite skarns; and III. Hedenbergite hornfels. Physical conditions are supposed to have been between 500 and 550°C, 1.5 kb total pressure and $X_{\text{CO}_2} = 0.1$.

Lapislazuli mineralization occurs in the first zone. This rock is largely composed of lazurite with small quantities of wollastonite, diopside, scapolite, calcite, and traces of afghanite, tremolite, allanite, pyrite, pyrrhotite, arsenopyrite and chalcopyrite. Lazurite is the mineral which confers the beautiful ultramarine color on the rock. The unit cell was determined by X-rays diffraction ($a = 9.08 \pm 0.01\text{Å}$), and the structural formula, by EM $([\text{Na}_{1,505}, \text{K}_{0,023}, \text{Ca}_{1,226}] \text{Al}_{5,455} \text{Si}_{6,143} \{ \text{SO}_3, \text{S}_x\text{Cl}_{1-x} \})$.

The genesis of the Flor de los Andes lapislazuli deposit is supposed to have occurred in two stages:

- Contact metamorphism (24 My), where the calcsilicate minerals besides haüyne were formed in the Na and Cl high value limestone.
- Hydrothermal alteration (13-9 My), where sulfur was introduced into the haüyne molecule, giving origin to lapislazuli.

Lapislazuli deposits in the world have different genesis, most of them are related to Precambrian evaporitic limestones subjected to regional metamorphism. The Chilean deposit is related with Mesozoic limestones intruded by a Tertiary monzogranitic pluton. These different genesis have had a unique physico-chemical condition to produce the lapislazuli. But such conditions are not necessarily the only geological setting in the world.

INTRODUCCION

El yacimiento Flor de los Andes es el único de lapisláuzuli conocido en Chile, y uno de los pocos de importancia económica en el mundo. Se ubica en la Alta Cordillera de Ovalle, Provincia de Limarí, en la falda occidental de un cerro fronterizo, en la pared erosionada de un circo glacial, a 3.600 m de altura y a unos 200 m del límite chileno-argentino, en las nacientes del arroyo Cazadero, afluente del río Tascadero. Sus coordenadas geográficas son 70°31'9" Long. W y 31°14'7" Lat. S (Fig. 1).

Antecedentes arqueológicos permiten presumir que el lapisláuzuli usado por las culturas precolombinas del ámbito andino era extraído de este yacimiento (Grau, 1973). La primera mención de carácter científico del mismo aparece en los Anales de la Universidad de Chile (Field, 1850). Posteriormente, Brügger (1921, 1926) presentó una detallada descripción del yacimiento y propuso algunos métodos para su óptima explotación. Por último, Zeballos (1973) y Rivano (1975, 1980) efectuaron estudios geológicos preliminares del yacimiento, proponiendo este último una interpretación para su génesis.

Brögger y Backstrom (1891) demostraron que se trataba de una roca constituida por lazurita, haüyna, diópsido, anfíbola, calcita y piritita. La lazurita es un feldespatóide del grupo de la sodalita, cuya fórmula es $(\text{Na}, \text{Ca})_8 \text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{24} (\text{SO}_4, \text{S}, \text{Cl})_2$ y se diferencia de la haüyna por tener un color azul profundo.

Yacimientos de lapisláuzuli han sido descritos en diferentes lugares del mundo. El más conocido de ellos se encuentra en Sar-E-Sang, Afganistán. Está emplazado en un skarn de una serie metamórfica precámbrica, de origen evaporítico (Blaise y Cesbron, 1966; Wyart *et al.*, 1972; Kulke, 1976). Otros yacimientos de menor importancia se ubican a orillas del lago Baikal en la U.R.S.S. y en la isla Baf-

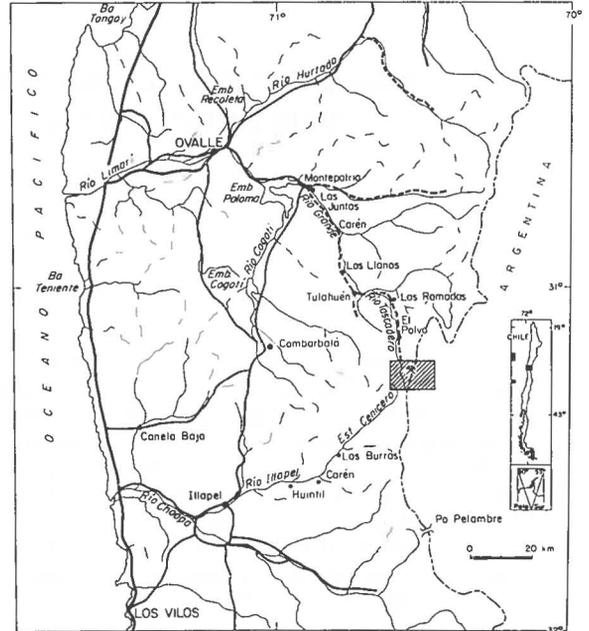


FIG. 1. Mapa de ubicación y vías de acceso.

fin, Canadá. Las condiciones geológicas de ambos yacimientos son similares a los de Afganistán. El lapisláuzuli se ubica en niveles calcáreos (dolomitas) evaporíticos, afectados por metamorfismo regional de alto grado (Korzinski, 1947; Ivanov, 1976; Hogarth y Griffin, 1978; Hogarth, 1979).

En Italian Mountain, Colorado (E.E.U.U.), existe un pequeño yacimiento de lapisláuzuli cuya génesis está asociada a metamorfismo de contacto. El lapisláuzuli se encuentra en mármoles dolomíticos carboníferos, intruidos por stocks monzoníticos terciarios (Cunningham, 1976; Hogarth y Griffin, 1980).

En el presente trabajo se establece la petrografía y mineralogía del yacimiento de lapisláuzuli Flor de los Andes y se avanzan algunas hipótesis acerca de su génesis.

MARCO GEOLOGICO

Este yacimiento se ubica en la zona externa de una aureola de metamorfismo de contacto, desarrollada por la intrusión de un cuerpo batolítico de la Unidad Río Las Cuevas (Rivano *et al.*, 1985) en calizas neocomianas de la Formación Río Tascadero (Rivano, 1980) (Fig. 2). La Formación Río Tascadero está constituida por una secuencia marina cal-

cárea del Berriasiano superior-Hauteriviano (Mpodzis, 1974; Rivano, 1975; 1980) cuyas facies, en las cercanías del yacimiento, corresponden a calcarenitas de color pardo-rojizo, con intercalaciones calcilitíticas y coquinoideas.

El cuerpo plutónico (Unidad Río Las Cuevas), en el sector inmediatamente adyacente al yaci-

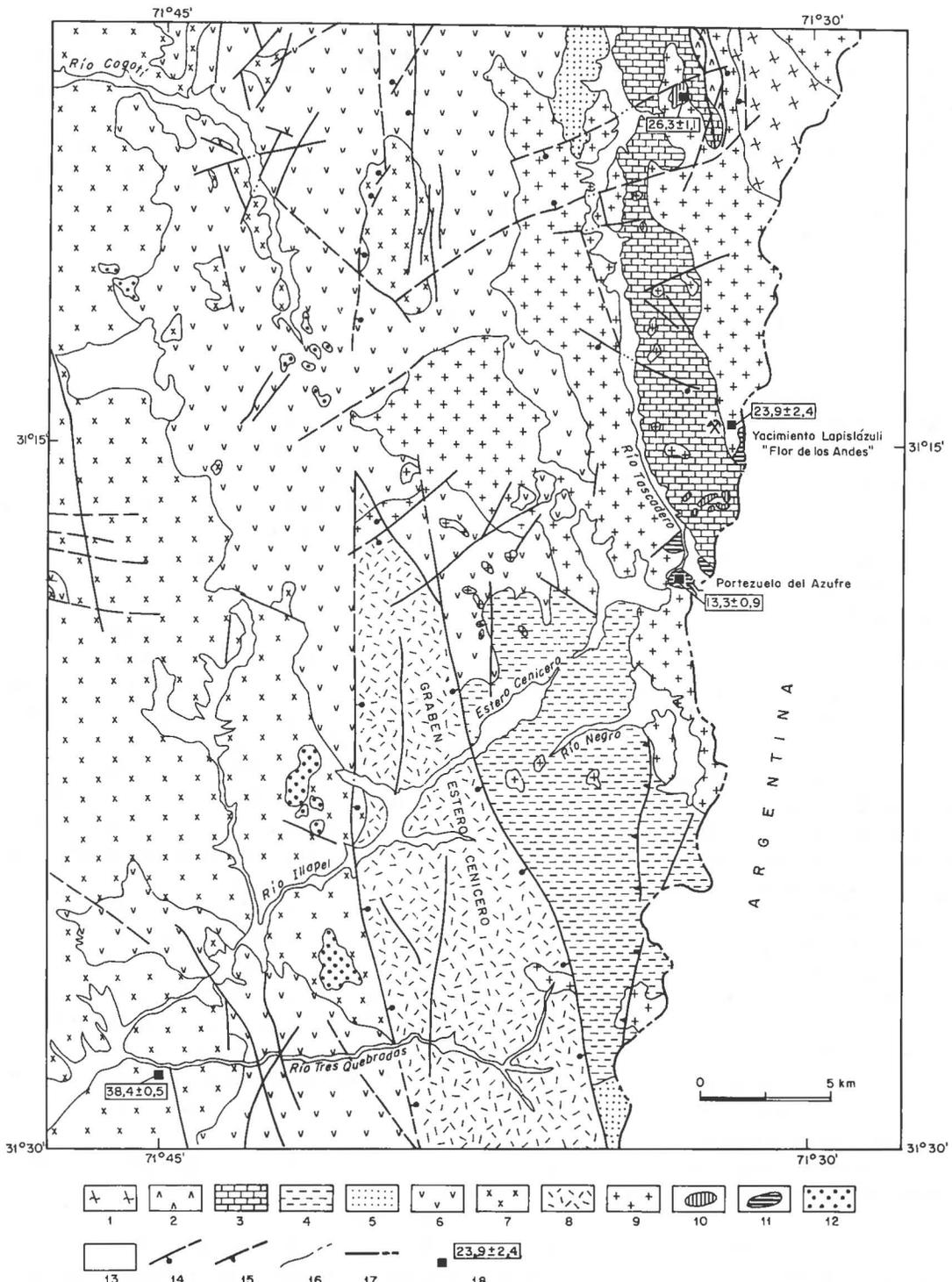


FIG. 2. Marco geológico del yacimiento de lapislázuli Flor de los Andes, basado en Rivano y Sepúlveda (en prensa). 1. Unidad Cochiguás (Carbonífero); 2. Formación Mostazal (Jurásico Superior); 3. Formación Tascadero (Berriasiano-Hauteriviano); 4. Formación Los Pelambres (Cretácico Inferior); 5. Formación Pucalume (Barremiano-Albiano); 6. Formación Viñita (Cretácico Superior); 7. Unidad Fredes (Cretácico Superior); 8. Formación Los Elquinos (Terciario); 9. Unidad Río Las Cuevas (Terciario); 10. Sedimentos cuaternarios; 11. Unidad El Polvo (Terciario); 12. Unidad Portezuelo El Azufre (Terciario); 13. Zona de alteración hidrotermal; 14. Falla normal; 15. Falla inversa; 16. Contacto geológico; 17. Límite internacional; 18. Edad radiométrica.

miento de lapislázuli, está formado por monzogranitos, con enclaves básicos y textura hipidiomorfa granular, constituidos por cuarzo (32,8%) en cristales de 0,5 - 32,0 mm; plagioclasa (24,7%) (An_{14}) en cristales tabulares de 0,5 - 3,7 mm; ortoclasa perfitica (41,3%) con tamaños variables entre 0,7 y 6,0 mm; biotita (1%) y opacos (0,2%). Una datación (K-Ar en biotita) de este cuerpo, en las cerca-

nías del yacimiento, dio una edad de $23,9 \pm 0,3$ Ma (Cuitiño, 1985) que es concordante con aquella de una granodiorita perteneciente a la misma unidad, en el yacimiento de cobre Pelambres, 30 km al sur (24 ± 1 Ma K-Ar en biotita) por lo cual, Rivano *et al.* (1985) señalaron una edad oligocena superior para la Unidad Río Las Cuevas.

LA AUREOLA DE METAMORFISMO DE CONTACTO

En el área del yacimiento, en la aureola, se distinguen franjas de distinto color, paralelas al contacto del intrusivo con la secuencia calcárea, que corresponde a la siguiente zonación (Fig. 3, Tabla 2):

- Zona I Mármoles con wollastonita
- Zona II Skarn con andradita - grossularita
- Zona III Corneana con predenbergita

Zona I o de mármoles. Corresponde a la franja más externa de la aureola, con un ancho aproximado de 300 m. Es en esta zona de la aureola donde se encuentra el yacimiento de lapislázuli. Está formada por mármoles de color gris-blanquecino. En esta zona, las rocas presentan textura granoblástica inequigranular, constituida por:

Calcita (60-80%) con textura poligonal y tamaños comprendidos entre 0,05 y 1 mm, ocasionalmente con maclas y sombras de presión.

Wollastonita (10-30%) en cristales xenomorfos a subautomorfos de 0,05 - 0,4 mm.

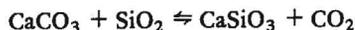
Escapolita (1%) ocurre esporádicamente en cristales amorfos de 0,08 - 0,1 mm.

Piroxeno (2-5%) tipo endiópsido según Poldevaart y Hess (1951), en cristales xenomorfos de 0,04 - 0,10 mm que, en parte, forma agregados nodulares en contacto con wollastonita y calcita. Su composición determinada según el método de Brown (1960), modificado por Cendrero (1970) es $Wo_{44}En_{48}Fs_8$.

Una fina disseminación de sulfuros se asocia a los mármoles de la Zona I. Los sulfuros corresponden a: **pirrotina** (2-3%) disseminada, en granos de 0,2 mm y agregados de 0,5 mm, con frecuentes inclusiones de **pirita** y "llamas" de **pentlandita**, cuyos bordes presentan un aspecto celular y, ocasionalmente, desarrollan formas propias; en forma subordinada se observa **arsenopirita** (< 1%) con

textura de crecimiento mutuo con pirrotina, y pirita (< 1%) que se presenta tanto en inclusiones como en cristales aislados en la ganga.

La presencia conjunta de calcita y wollastonita indican que la sílice es deficitaria en la Zona I. La aparición de wollastonita está dada por la reacción



La wollastonita se forma a temperatura mínima de 400°C y es función de la presión y de la fracción molar de CO_2 (X_{CO_2}) en los fluidos. Einaudi (1974) consideró que en el metamorfismo de rocas calcáreas la X_{CO_2} es aproximadamente 0,1. Si se acepta este valor de X_{CO_2} y una profundidad de emplazamiento del plutón de 4-5 km (Rivano, 1975) la temperatura de formación de la wollastonita sería aproximadamente de 500-550°C, según diagramas de equilibrio en Winkler (1976).

Zona II o de skarn. Ocupa una posición intermedia dentro de la aureola de contacto y alcanza un ancho variable entre 80 y 120 m. Las rocas de esta zona presentan un color verde-parduzco, con tonos amarillos y textura granoblástica inequigranular. El mineral preponderante es el granate (80-90%) acompañado de calcita, endiópsido (5-10%), wollastonita (1-2%), plagioclasa (1%) y tremolita (< 1%).

Los granates son de tipo grossularita-andradita. La composición de cristales representativos aparece en la tabla 1.

En esta zona, los minerales metálicos son escasos, restringiéndose a la presencia esporádica de pirita arsenical (< 1%) en cristales subhedrales de 0,01 mm, y a algunos núcleos de magnetita de 10-15 mm, ubicados intersticialmente en los granates.

La aparición de granate en la Zona II permite trazar una segunda isógrada. La composición de los granates es variable entre grossularita y andradita,

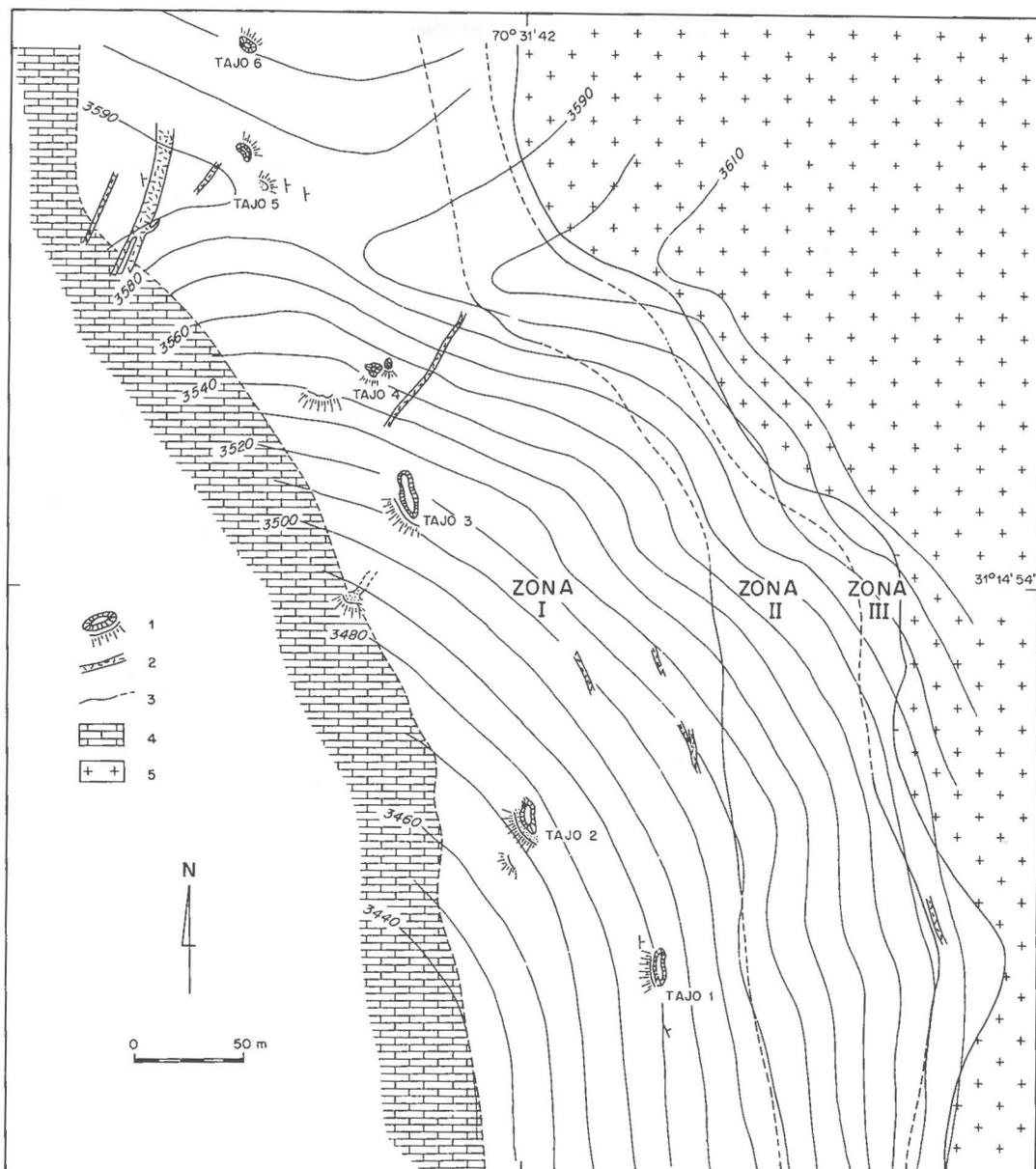


FIG. 3. Zonación mineralógica de la aureola de metamorfismo de contacto. Zona I: mármoles con wollastonita; Zona II; skarn con andradita-grossularita; Zona III: rocas corneanas con hedenbergita. Modificado de Zeballos (1973). 1. Tajo; 2. Filón; 3. Contacto entre zonas mineralógicas; 4. Caliza; 5. Monzogranito.

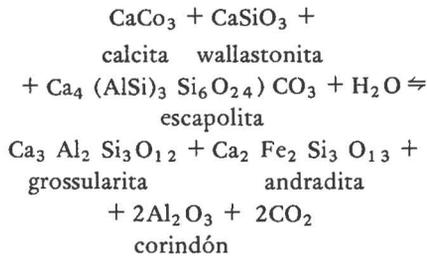
TABLA 1. COMPOSICION DE LOS GRANATES EN LA ZONA II, SEGUN EL METODO DE SRIRAMADAS (1957)

Muestra	a [Å]	n	Composición
84 - C	11,97	1,830	Gross 37,1 - And 62,4 - Alm 0,4
96 - C	11,98	1,805	Gross 32,0 - And 67,7 - Alm 0,2
100 - C	11,93	1,805	Gross 52,6 - And 45,4 - Alm 2,0

(a = arista de la celda-unidad; n = índice de refracción)

según contengan Al ó Fe, además de Ca.

Una reacción que probablemente explica la formación del granate sería la siguiente:



Estas reacciones corresponden a lo observado petrográficamente y estarían de acuerdo con las reacciones de equilibrio sugeridas por Enaudi (1974, comun. escrita).

Zona III o de corneana. Es la zona más interna, adyacente al intrusivo, y su ancho varía entre 40 y 50 m. Las rocas de esta zona corresponden a rocas corneanas de grano fino y color oscuro. Al microscopio, presentan textura granobástica equigranular, caracterizada por la presencia de clinopiroxeno, plagioclasa, cuarzo y magnetita. El **clinopiroxeno** (80%) presenta formas subautomorfas de 0,1-1,0 mm, y su composición es $\text{Wo}_{48}\text{En}_{46}\text{Fs}_{46}$, de acuerdo al método de Cendrero (1970) y corresponde a hedenbergita. La **plagioclasa** (10%) se encuentra en cristales xenomorfs de 0,1-1,5 mm; el **cuarzo** (5-10%), en agregados de 1,8 mm, con textura de mosaico y frecuentes suturas. Es probable que este cuarzo sea, en parte, hidrotermal. Inter-

ticialmente aparece magnetita (5%).

La desaparición total de la wollastonita y del granate de la Zona II y la aparición de abundante hedenburgita y magnetita, que caracteriza a la Zona III, permiten sugerir que su presencia y su campo de estabilidad, dependen directamente de los potenciales químicos del O_2 y del S_2 (μO_2 y μS_2) (Burt, 1972) y no de diferencias en la temperatura.

Considerando que entre las calizas externas, fuera de la influencia del metamorfismo de contacto y de la aureola de éste, no existen cambios de espesor en las capas, se asume que el volumen de las rocas permaneció constante durante el metamorfismo y el metasomatismo, variando sólo la densidad y porosidad de las rocas involucradas.

Cálculos según el método de Reid (1978) indican que el metamorfismo y el metasomatismo aumentaron la densidad de las rocas, dentro de la aureola, en un 10%, y disminuyeron la porosidad, hasta en un 100% con respecto a la roca sin metamorfismo de contacto (Cuitiño, 1985). La comparación de los análisis químicos compensados a volúmenes iguales (100 cc), indican un aumento en el contenido de sílice, desde las calizas más externas, hasta las Zonas I y II, de casi un 100%. Junto a ello se observa un metamorfismo progresivo de Al_2O_3 , FeO_3 y MnO , hacia las cercanías del plutón. El contenido de Na_2O aumenta localmente en la Zona I, disminuyendo en forma ostensible en la Zona II. El S presenta un comportamiento similar al del Na_2O .

EL YACIMIENTO FLOR DE LOS ANDES

El yacimiento de lapisláuzli Flor de los Andes se ubica en la Zona I de la aureola de metamorfismo de contacto, distribuido en una franja norte-sur de aproximadamente 800 m de longitud. La explotación de este yacimiento se efectúa por medio de tajos y canteras (Fig. 3). El lapisláuzli se presenta en forma irregular y es común observar diques medandesíticos cortando el yacimiento. A continuación se presenta una breve descripción de las labores en el yacimiento.

- **Tajo 1** (Cota 3.490 m). Elongado en dirección norte-sur. La roca de caja es mármol de color gris-blanquecino, con textura granular. El lapisláuzli se encuentra en lentes, de espesor y largo variables, entre 5 y 8 cm y 0,4-2 m, respectivamente, concordando con la estratificación, y bolsanadas irregulares. El color azul varía de intenso, en el centro, a tonalidades más pálidas, hacia los márgenes. El lapisláuzli de color azul intenso, que es el material de valor ge-

mológico, se extrae en fragmentos de hasta 20 cm de diámetro. Tanto la roca de caja como el lapisláuzli están atravesados por un enrejado de diques grises de orientación $\text{N}20^\circ\text{-N}30^\circ\text{W}$ y espesor de hasta 2 m.

- **Tajo 2** (Cota 3.475 m) Esta labor es la que ha sido más explotada, ya que en ella se ha obtenido la mayor cantidad de lapisláuzli de buena calidad. El lapisláuzli aparece en bandas azules intercaladas con mármol gris, de textura granular, en el cual se preservan los planos de estratificación de rumbo variable $\text{N}10^\circ\text{-N}20^\circ\text{E}$ y manto casi vertical.

- **Tajo 3** (Cota 3.515 m). La mineralización de este tajo es de menor volumen que los anteriores y está formada por lentes y manchones de lapisláuzli de 10-50 cm, intercalados en los mármoles.

- **Tajo 4** (Cota 3.555 m). En esta labor el lapisláuzli es escaso, y de calidad inferior, observándose lentes de 5-10 cm de espesor y bolsanadas de 40 cm de diámetro, con sólo esporádicas zonas de color azul intenso, de buena calidad gemológica.

CARACTERISTICAS MINERALOGICAS DEL YACIMIENTO

Petrografía del LapislázuLi

El lapislázuLi es una roca calcosilicatada, cuyo color varía de azul intenso a celeste. Las unidades de azul intenso, de mayor valor gemológico (Muestras 76a, 76Cc, 66C y 2C), presentan una textura granoblástica inequigranular y están constituidas por los siguientes minerales:

Lazurita (64,7%) en microblastos xenomorfos de 20 micrones a 0,3 mm, aislados y en agregados con textura poligonal, color azul, isótropo (índice de refracción: 1,51). Reemplaza tanto a wollastonita, como a plagioclasa; en partes, el reemplazo de un cristal es parcialmente compartido con haüyna, que disminuye la intensidad del color azul (Cuitiño, 1985, Microfotografía 23).

Haüyna (2-3%) en microblastos xenomorfos de 20 micrones a 0,1 mm, con texturas poligonales. Excepcionalmente se observan venillas de 0,2 mm de espesor, con cristales idioblásticos de hasta 0,4 mm y buen desarrollo del clivaje.

Diópsido (3-4%) en microblastos subredondeados de 20-50 micrones que, en pocos casos, alcanzan a 0,1 mm.

Escapolita (0,7%) en microblastos xenomorfos a hipidiomorfos de 50 micrones.

Calcita (3-5%) recristalizada con textura poligonal, con cristales de 30 micrones a 0,2 mm.

Plagioclasa (0,5%) totalmente albitizada; en algunas muestras se observan relictos de hasta 0,3 mm.

Afghanita (0,1%) en cristales aciculares de 0,05 mm, en contacto con lazurita.

Allanita (0,1%) en agregado granular de 0,1 mm.

Tremolita (0,3%) en cristales aciculares de 0,05 mm, presente sólo ocasionalmente.

Epidota (0,7%) tipo allanita, en agregados granulares finos, ubicada intersticialmente en cristales mayores.

Siderita (0,5%) en agregados granulares finos, ubicada intersticialmente en cristales mayores.

Opacos (1,6%) en cristales cúbicos y agregados granulares finos.

La variedad de lapislázuLi celeste (Muestras 133C, 138C y 61Ce) presenta una mineralogía similar y sólo difiere la proporción de ellos. En este caso, la lazurita aparece en volúmenes menores, aumentando, en cambio, la cantidad de haüyna y de wollastonita (Tabla 3).

Ambas variedades presentan, también, las mismas especies de minerales opacos. Sin embargo, mientras la variedad de azul intenso (Muestras 76C y 66C), presentan sólo una disseminación fina, la de tonalidades celestes (Muestras 133C y 162C) exhiben mayor cantidad de opacos disseminados, encontrándose, además, en lentes y vetillas. Los minerales opacos corresponden a:

Pirita arsenical (10-15%) con cantidades subordinadas de **calcopirita** y **arsenopirita**, presenta una amplia gama textural y granulometría que varía desde disseminación de pecas menores a 0,01 mm a cubos y piritoedros de 0,10 mm a agregados anhedrales de 0,40 mm. La **arsenopirita (0,1%)** aparece en cristales de 0,05 mm y la **calcopirita (0,5%)** se encuentra en cristales anhedrales de 0,1 mm, aislados y también en agregados, frecuentemente en contacto con pirita.

TABLA 3. ANALISIS MODAL DE DOS GRUPOS DE MUESTRAS DE LAPISLAZULI

	Azul Intenso				Celeste			
	76Ca	76Cc	66C	Prom.	133C	138C	61Ce	Prom.
Lazurita	65,2	65,6	63,6	64,7	40,8	39,4	42,1	40,8
Haüyna	3,1	1,8	2,0	2,3	4,6	4,8	5,3	4,9
Sodalita	0,5	0,2	—	0,2	—	—	0,1	0,1
Wollastonita	22,3	20,6	21,1	21,3	42,3	25,6	38,8	35,6
Diópsido	4,1	3,8	2,2	3,4	4,4	3,8	3,3	3,8
Escapolita	0,7	1,2	0,3	0,7	0,3	3,4	0,5	1,5
Plag. Albitiz.	0,5	0,8	0,2	0,5	0,1	0,1	0,2	0,1
Tremolita	0,6	—	0,2	0,3	0,1	—	—	0,1
Epidota	0,6	0,7	0,9	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
Calcita	1,0	2,3	7,2	3,5	3,8	20,2	6,2	10,6
Siderita	0,3	0,8	0,5	0,5	0,2	0,5	1,1	0,6
Pirita	1,1	2,0	1,8	1,6	3,2	2,0	2,3	2,8

MINERALOGIA DE LAZURITA

La presencia y proporción de lazurita en el lapislázuli condiciona la tonalidad azul de éste y, por consiguiente, su valor gemológico. A continuación se caracterizan, mineralógicamente, las diferentes modalidades tonales de la lazurita.

En el lapislázuli azul intenso (Muestras 76C y 76Cc), se determinó por difracción de rayos X la presencia dominante de lazurita, identificándose claramente los “peaks” principales y la mayoría de los secundarios (Fig. 4; Tabla 4). Además de lazurita se identificaron las principales reflexiones de afghanita ((Na, Ca)₁₂ (Si, Al)₁₆ O₃₄ (Cl, SO₄)₄), feldespatoide del grupo de la cancrinita, sodalita y haüyna (Tabla 4a).

La morfología cristalina de la lazurita se estudió con microscopio electrónico de barrido (SEM) en un sector de azul profundo homogéneo (Muestra 76C). La lazurita forma cristales de simetría cúbica

TABLA 4. PRINCIPALES REFLEXIONES DE LAZURITA

d (Å)	I/I	(h k l)
3,71	100	(211)
2,62	80	(222)
2,87	45	(310)
6,41	40	(110)
2,14	35	(411)
1,78	30	(510) (431)
2,27	25	(400)
1,60	20	(200)
1,37	18	(622)
2,42	16	(321)
3,22	16	(220)
1,47	14	(611) (532)
1,55	10	(530)
3,13	6	—
1,92	4	(332)

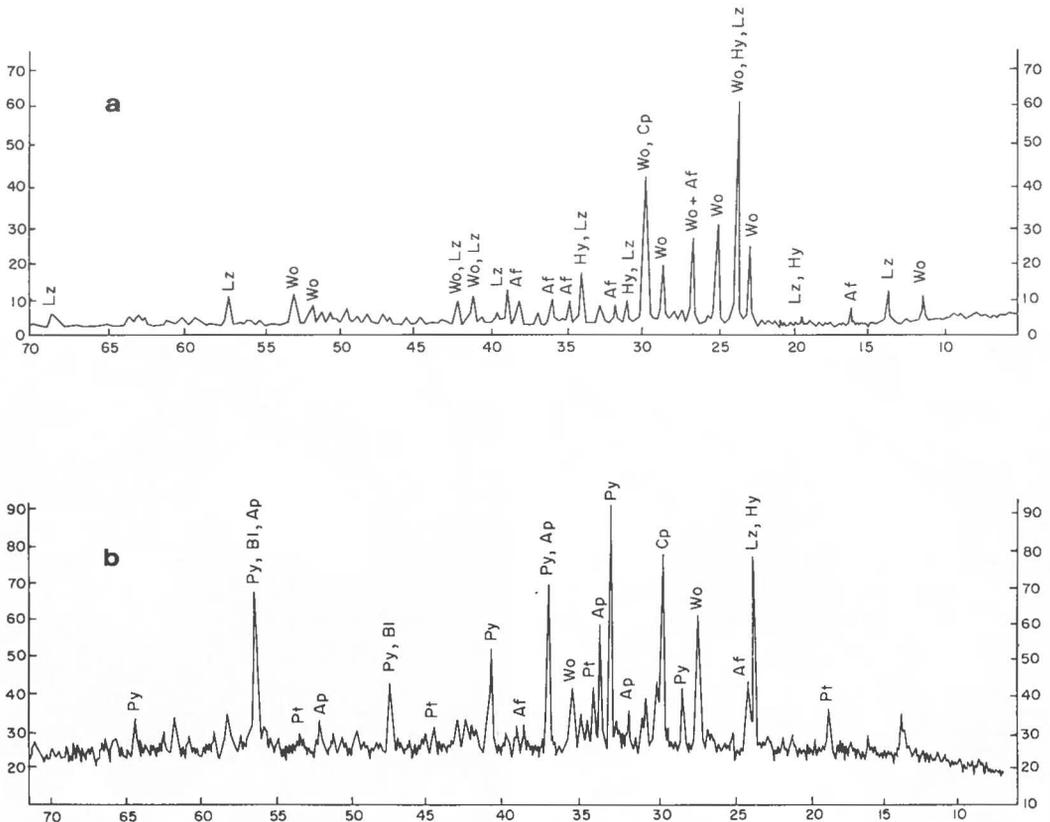


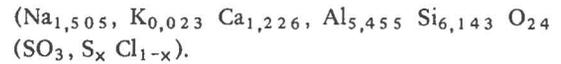
FIG. 4. Difractogramas de Rayos X de lapislázuli azul intenso, separado en dos fracciones; a. azul; b. metálica. Lz: lazurita; Hy: haüyna; Sd: sodalita; Af: afghanita; Wo: wollastonita; Cp: calcopirita; Py: pirita; Ap: arsenopirita; Pt: pirrotina; Bl: blenda.

(Microfotografía 1a) de 5-40 μm ; presenta formas simples, de caras bien definidas (Microfotografía 1b) reconociéndose planos (111) de 10 μm de lado. Otros cristales muestran formas más complejas, con una combinación de octaedro truncado en su vértice por una cara (110) de menor desarrollo.

En un estudio semicuantitativo, realizado con microsonda electrónica (EM), se analizaron cristales de lazurita azul, celeste y celeste-verdoso. En todos los casos, se reconoció la presencia de Ca, Si, Al, Na, K, S, Cl, que coinciden proporcionalmente, dentro de un rango aceptable, con la fórmula de lazurita indicada por Strunz (1970) y confirmada por Hogarth y Griffin (1976). El único elemento que varía notablemente con la tonalidad de color azul es el azufre, pudiendo observarse que existe una relación directa entre la intensidad del color y el aumento de contenido de S en la molécula de lazurita. En la variedad celeste-verdosa, se detectó la presencia de Cl, lo que revelaría un reemplazo de cloro en azufre. Una de las muestras que presenta una mayor variedad en el color azul fue objeto de un análisis cuantitativo (Muestra 65C, Tabla 6). El análisis se realizó en puntos cercanos de tonalidades azules y celestes. De los resultados obtenidos (Tabla 6) se desprende que el contenido de Al_2O_3 alcanza valores altos en las variedades de lazurita azul intenso (33,06-34,81%) en contraste con las tonalidades celestes y celeste-verdosas que presentan un contenido menor (24-26,1%). El SiO_2 presenta un comportamiento inverso, aumentado en las variedades pálidas, celeste

y verdosa (50-55,8%), y disminuye en los cristales de color azul profundo (40,0-42,2%). Inversamente, el Na_2O aumenta hasta tres veces su contenido en los cristales celestes con respecto a la lazurita azul profundo (2,9-9,5%), respectivamente. Finalmente, el potasio y el calcio manifiestan un comportamiento errático con respecto a la intensidad del color azul en la lazurita. No se cuantificó el azufre por dificultades de análisis.

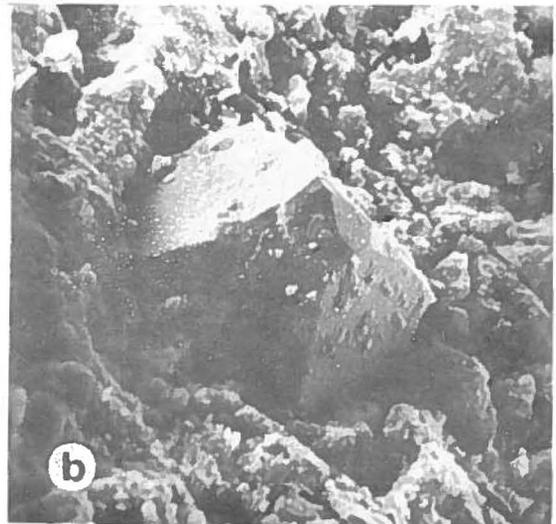
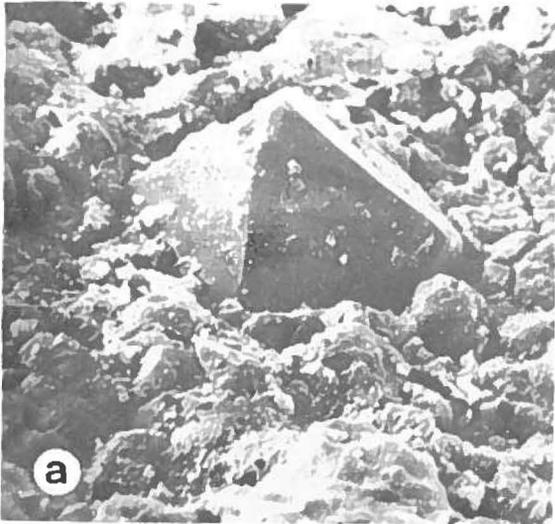
En consecuencia, se puede establecer, tentativamente, la siguiente fórmula estructural para la lazurita del yacimiento Flor de los Andes.



Comparando la lazurita del yacimiento Flor de los Andes con la de otras localidades (Tabla 6) se puede señalar que ésta es deficiente en sodio y rica en aluminio y silicio, mientras que los valores de calcio y potasio son similares.

TABLA 4a. PRINCIPALES REFLEXIONES DE AFGHANITA

d	I/I	(h k l)
5,43	30	(21)
2,17	30	(502)
11,19	10	(100)
2,31	30	(136) (405)
1,88	10	(506) (245)
1,93	40	(244) (408)
2,13	60	(330)
3,30	100	(124)



Microfotografía 1. Cristales cúbicos isooctaédricos (Muestra 76C). Microfotografía con microscopio electrónico de barrido (SEM) a. Cristal con caras (111) octaédricas; b. Combinación de caras (111) y probable (110). (x 2.800).

En base a estos análisis se determinó la arista de la celda-unidad (a) de la lazurita (Tabla 5) con un valor de $9,08 \pm 0,01 \text{ \AA}$, levemente mayor al calculado por Hogarth y Griffin (1976) para la lazurita del yacimiento Baffin en Canadá ($8,92 \text{ \AA}$).

En la fracción metálica, las reflexiones que aparecen con mejor resolución e intensidad son las correspondientes a pirita, calcopirita y arsenopirita.

TABLA 5. DIMENSIONES DE LA CELDA-UNIDAD DE LAZURITA

d	h k l	a (Å)
3,71	222	9,08
6,41	111	9,08
2,87	310	9,08
2,62	322	9,07

TABLA 6. ANALISIS QUIMICOS DE LAZURITA CON MICROSONDA ELECTRONICA (EM)

	Flor de los Andes					Prom.	Baffin	Baikal	Afgan.
	61-1**	65-2*	65-3*	65-4*	65-5**		Prom.	Prom.	Prom.
Na ₂ O	6,67	2,82	4,25	3,09	9,49	5,26	19,50	17,51	15,5
Al ₂ O	24,00	34,80	33,06	33,94	26,06	30,37	27,10	25,30	26,27
SiO ₂	50,00	42,80	39,23	40,01	55,50	45,51	33,50	32,40	31,34
K ₂ O	0,23	0,11	0,08	0,12	0,13	0,13	0,11	0,95	1,02
CaO	13,02	8,70	6,24	5,86	4,41	7,65	5,00	7,36	7,79
Iones basados en 24 átomos de oxígeno									
Na	1,821	0,829	1,342	0,96	2,573	1,505	6,933	5,751	5,882
Al	3,982	6,226	6,343	6,427	4,297	5,455	5,857	6,038	5,964
Si	7,066	6,410	6,359	6,428	7,798	6,812	6,143	6,249	6,036
K	0,042	0,021	0,015	0,024	0,023	0,025	0,026	0,234	0,251
Ca	1,963	1,411	1,088	1,009	0,660	1,226	0,982	1,508	1,645

* Lazurita color azul intenso

** Lazurita color celeste

CONCLUSIONES

Probables condiciones de génesis de lapislázuli en el Yacimiento Flor de Los Andes

La génesis de una roca de tan escasa ocurrencia como es el lapislázuli, que se desarrolla en una situación geológica común, como es el metamorfismo de contacto de calizas, debe explicarse por la concurrencia de circunstancias muy especiales. Considerando las texturas y paragénesis de los minerales en la aureola en las Zonas I, II y III y las características geoquímicas de dichas zonas, se pueden establecer, tentativamente, dos etapas en la génesis del lapislázuli.

a) **Etapas de metamorfismo de contacto.** Se produce durante la intrusión del Batolito Río Las Cuevas en el Oligoceno (24 Ma). En la Zona I de la aureola de metamorfismo de contacto se desarrollan minerales calcosilicatados como wollastonita, diópsido, escapolita y haüyna, en un sistema químico subsaturado en SiO₂, como son las calizas de la Formación Río Tascadero.

La haüyna aparece en contacto con los minerales calcosilicatados mencionados anteriormente, por lo que pueden considerarse contemporáneos. En la formación de la haüyna existe la posibilidad de sustitución isomorfa de calcio por sodio ($\text{Ca}^{++} \rightleftharpoons \text{Na}^+$) (Barth, 1932). En el caso de este yacimiento, el contenido de sodio (5,26%) de la haüyna es menor que el observado en otros yacimientos, como es el caso de Afganistán (15,5%) y Baffin (19,5%).

b) **Etapas de alteración hidrotermal.** La formación de lazurita parece estar íntimamente ligada a la introducción de azufre en la molécula de haüyna. En efecto, el azufre, que otorga el color azul característico de la lazurita y, por lo tanto, al lapislázuli, entra fácilmente en la molécula de haüyna, aprovechando la debilidad de sus enlaces (Deer *et al.*, 1965). Este azufre se resuelve en azufre libre S y SO₃, en proporción aproximada de 0,16:1 (Hogarth y Griffin, 1976). La composición isotópica del azufre ($\sigma^{34}\text{S} = 9,53$) y del oxígeno ($\sigma^{18}\text{O} = 14,5$) indican una proveniencia ígnea del azufre

(Hildreth, 1983, comun. escrita).

La fuente de origen del azufre es problemática. Sin embargo, en el Mioceno de la Alta Cordillera del Norte Chico ocurrieron fenómenos de alteración hidrotermal a gran escala, caracterizados por el desarrollo de vastos sistemas geotérmicos, asociados a alteración argílica avanzada y a actividad solfatárica (Maksaev *et al.*, 1984) que, en general, presentan abundantes sulfatos e incluso azufre libre de origen solfatárico. Los halos de alteración se desarrollan, normalmente, en la periferia de pequeños stocks e intrusivos subvolcánicos. Unos de estos cuerpos está ubicado 3 km al sur del yacimiento de lapisláuzuli, en Portezuelo del Azufre, y ha sido datado en $13,3 \pm 0,9$ Ma (Rivano *et al.*, 1985). Por consiguiente, es posible que la intensa actividad hidrotermal miocena haya aportado el azufre que, al introducirse en la molécula de haüyna, se transformó en lazurita originando, de esta manera, el lapisláuzuli.

Comparación con otros yacimientos de lapisláuzuli

La mayoría de los yacimientos de lapisláuzuli

conocidos en el mundo se desarrollan en terrenos precámbricos y su génesis está ligada a metamorfismo regional en depósitos evaporíticos, como en el caso de Sar-e-Sang (Afganistán), Baffin (Canadá) y en el lago Baikal (U.R.S.S.). El único yacimiento que tendría una génesis relacionada a metamorfismo de contacto, desarrollado por intrusivos terciarios, como el del yacimiento Flor de los Andes, es el depósito de Italian Mountain, Colorado (EE. UU.).

En conclusión, basándose en el origen del yacimiento Flor de los Andes y en su comparación con otros yacimientos de lapisláuzuli en el mundo, puede establecerse que no existen condiciones geológicas únicas para la génesis de esta roca. Sin embargo, es determinante un ambiente químico apropiado, deficitario en SiO_2 , en un protolito calcáreo adecuado, en el cual se desarrolle haüyna. Simultánea o posteriormente, como es el caso de este yacimiento, debe existir un aporte penetrativo de azufre, el cual, al introducirse en la molécula de haüyna, generará lazurita, originándose el característico color azul del lapisláuzuli.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a las instituciones y al personal que colaboraron en el desarrollo de los diversos análisis. Los análisis cualitativos de microsonda (EM) se realizaron en un equipo CAMECA en el Depto. de Geología de la Universidad de Chile; los cuantitativos, en un equipo MAC provisto de un sistema EDS en la Universidad de Colorado, Boulder (por Francisco Hervé). El análisis en microscopio electrónico (SEM) se efectuó en un equipo

SIEMENS de IDIEM. Los análisis de difracción de Rayos X y los análisis químicos se realizaron en los laboratorios del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Se agradece en forma especial la revisión crítica del texto y sugerencias del colega Alvaro Puig y del profesor Francisco Hervé.

Este trabajo es una contribución al Proyecto No. 249 del PICG.

REFERENCIAS

- BARTH, T.F.W. 1932. The structures of the sodalite family. *Zeit. Kristall.*, Vol. 23, No. 405-414.
- BLAISE, J.; CESBRON, F. 1966. Données mineralogiques et petrographiques sur le gisement de lapislazuli de Sar-e-Sang, Hindou-Kouch, Afghanistan. *Bull. Soc. Miner. et Cristall.*, Vol. 89, p. 333-343.
- BROGGER, W.C.; BLACKSTROM, H. 1981. Die Mineralien der Granatgruppe. *Zeit. Kristall.*, Vol. 18, p. 209.
- BROWN, G.M. 1960. The effect of iron substitution on the unit-cell dimensions of the common clinopyroxenes. *Am. Mineral.*, Vol. 45, No. 1-2, p. 15-38.
- BRÜGGEN, J. 1921. Informe geológico sobre el yacimiento de lapisláuzuli Flor de los Andes del Sr. Santiago M. Merry. Particular (inédito), 10 p. Santiago.
- BRÜGGEN, J. 1926. Segundo informe sobre las minas de lapisláuzuli de Ovalle. Particular (inédito), 8 p. Santiago.
- CENDRERO, A. 1970. Determinación de composición química de los clinopiroxenos por medio de difracción de Rayos-X. *Estud. Geol. (Inst. Invest. Geol. "Lucas Mallada")*, Vol. 26, No. 4, p. 417-422.
- CUITINO, L. 1985. Estudio geológico del yacimiento de lapisláuzuli Flor de los Andes. Memoria de Título.

- Univ. Chile, Depto. Geol. y Geofís., 150 p. Santiago.
- CUNNINGHAM, C.G. Jr. 1976.** Petrogenesis and post-magmatic geochemistry of the Italian Mountain intrusive complex, eastern Elk Mountain, Colorado. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 87, No. 6, p. 897-908.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. 1966.** Rock-forming minerals. Vol. 4, Longmans, Green & Co., 435 p. London.
- EINAUDI, M. 1974.** A calc-alkaline petrogenetic grid and its application to contact metamorphic-metasomatic zonation.
- FIELD, F. 1850.** Análisis de lapislázuli de Elqui. *Univ. Chile, An.*, p. 386. Santiago.
- GRAU, J. 1973.** El mundo de las piedras semi-preciosas. *Oikos*, 254 p. Buenos Aires.
- HOGARTH, D.D. 1979.** Afghanite; new occurrences and chemical composition. *Can. Mineral.*, Vol. 17, Part 1, p. 47-52.
- HOGARTH, D.D.; GRIFFIN, W.L. 1976.** New data on lazurite. *Lithos*, No. 1, p. 39-57.
- HOGARTH, D.D.; GRIFFIN, W.L. 1978.** Lapislazuli from Baffin Island; a Precambrian meta-evaporite. *Lithos*, Vol. 11, No. 1, p. 37-60.
- HOGARTH, D.D.; GRIFFIN, W.L. 1980.** Contact-metamorphic lapislazuli; the Italian Mountain deposits, Colorado. *Can. Mineral.*, Vol. 18, Part 1, p. 59-70.
- IVANOV, V.G. 1976.** The geochemistry of formation of the rocks of the lapislazuli deposits of the southern Baykal region. *Geochem. Int.*, Vol. 13, No. 1, p. 26-31.
- KORZHINSKI, D.S. 1947.** Gîsements bimetasmáticos de phlogopite et lazurite de l'Archéen de la región du lac Baikal. *Trudy Ins. Geol. Nauk, S.S.S.R.*, No. 29, p. 1-64.
- KULKE, H.H.G. 1976.** Metamorphism of evaporitic carbonate rocks (NW Africa and Afghanistan) and the formation of the lapislazuli. *In Congr. Geol. Int.*, No. 25, Resúmenes, Vol. 1, sec. 3, p. 131-132.
- MAKSAEV, V.; MOSCOSO, R.; MPODOZIS, C.; NASI, C. 1984.** Las unidades volcánicas y plutónicas del Cenozoico superior de la Alta Cordillera del Norte Chico (29°-31°S): Geología, alteración hidrotermal y mineralización. *Rev. Geol. Chile*, No. 21, p. 11-51.
- MPODOZIS, C. 1974.** Geología de la Cordillera de Ovalle, provincia de Coquimbo, entre 30° 20' y 30° 55' Lat. sur. Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol., 191 p. Santiago.
- POLDEVAART, A.; HESS, H.H. 1951.** Pyroxenes in the crystallization of basaltic magma. *J. Geol.*, Vol. 59, No. 5, p. 472-489.
- REID, J. 1978.** Skarn alteration of the commercial limestone, Carr Fork area, Bingham, Utah. *In An issue devoted to the Bingham mining district (Enaudi, M.; et al.; eds.). Econ. Geol.*, Vol. 73, No. 7, p. 1315-1325.
- RIVANO, S. 1975.** Reconocimiento geológico de las nacientes del río Grande (Alta Cordillera de Ovalle, entre los 30° 50' y 31° 20' Lat. sur, Provincia de Coquimbo). Memoria de Título. Univ. Chile, Depto. Geol., 214 p. Santiago.
- RIVANO, S. 1980.** Cuadrángulos D-86, Las Ramadas, Carrizal y Paso Río Negro, Región de Coquimbo. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile*, Nos. 41-44, 68 p.
- RIVANO, S.; SEPULVEDA, P.; HERVE, M.; PUIG, A. 1985.** Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32°, latitud sur, Chile. *Rev. Geol. Chile*, No. 24, p. 63-74.
- RIVANO, S.; SEPULVEDA, P. (en prensa).** Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile.
- SRIRAMADAS, A. 1957.** Diagrams for correlation of un-cell edges and refractive indices with the chemical composition of garnets. *Am. Mineral.*, Vol. 42, No. 3-4, p. 294-298.
- STRUNTZ, H.; TENNYSON, C. 1970.** Mineralogische Tabellen; eine Klassifizierung der Mineralien auf kristallchemischer Grundlage, mit einer Einführung in die Kristallchemie. 5th edit. Akademische Verlagsges., Geest & Portig, 621 p. Leipzig.
- WINKLER, H. 1976.** Petrogenesis of metamorphic rocks. 4th edit. Springer-Verlag, 348 p. New York.
- WYART, J.; BARIAND, P.; PHILIPPI, F. 1972.** Le lapislazuli du Sar-e-Sang (Badakhshan, Afghanistan). *Rev. Géol. Phys. et Géol. Dyn.*, Vol. 14, Facs. 4, p. 443-458.
- ZEBALLOS, J. 1973.** Estudio geológico preliminar del yacimiento de lapislázuli de Río Tascadero, Ovalle. (ENAMI) (inédito), 41 p. Santiago.