

## LAS MINERALIZACIONES DE URANIO EN LAS ROCAS VOLCANICAS DE MACUSANI, PUNO (PERU)

A. Arribas (\*) y E. Figueroa (\*\*)

### RESUMEN

Los caracteres petrográficos, mineralógicos y tectónicos de los indicios uraníferos de Macusani, situados 150 kilómetros al NNW del lago Titicaca, en Perú, hacen de estas mineralizaciones un caso único entre los yacimientos de U asociados con rocas piroclásticas. Así los estudios llevados a cabo demuestran que:

1. Los minerales de U se hallan principalmente en los niveles superiores de la pila volcánica.
2. Las rocas encajantes corresponden a ignimbritas riolíticas y riodacíticas, plio-cuaternarias, formadas por cuarzo, sanidina, oligoclasa, biotita y, ocasionalmente, moscovita y andalucita, en una matriz vítrea, parcialmente desvitrificada, que contiene numerosos clastos de lutitas.
3. La biotita, cuarzo ahumado y andalucita son muy abundantes en los niveles mineralizados.
4. Los minerales metálicos se componen casi exclusivamente de pechblenda masiva, más o menos transformada en gummitas, fosfatos y silicatos de U, y muy escasos sulfuros de Fe.
5. La pechblenda rellena fracturas que miden entre unos centímetros y varios metros de longitud, y de 1 a 100 milímetros de anchura. Algunas de estas fracturas son subverticales y debidas a la contracción que dio lugar a la disyunción columnar. Otras son subhorizontales y paralelas a un sistema de cizallas dúctiles, conjugadas, que se desarrolló por compactación y asentamiento de los materiales piroclásticos que contienen la mineralización.

De acuerdo con esos factores, se propone en este trabajo un modelo metalogénico preliminar para explicar el origen de este singular tipo de yacimientos de uranio.

**PALABRAS CLAVE:** Uranio, ignimbritas, Puno, Perú, macusanita, metalogenia.

### ABSTRACT

The Macusani U deposits, located 150 km. NNW of the Titicaca lake, in Perú, are characterized by certain petrological, mineralogical and tectonic features which make them a unique type of U mineralization among those normally associated with pyroclastic rocks. These features can be outlined as follows:

1. The U minerals occur almost exclusively in the upper levels of the volcanic pile.
2. The host rocks, Plio-Quaternary ignimbrites of rhyolitic to rhyodacitic composition, consist of quartz, sanidine, oligoclase and biotite, and occasionally muscovite and andalusite. These minerals occur within a partially devitrified glassy matrix that contains numerous xenoliths of pelitic material.

---

(\*) Departamento de Geología y Mineralogía, Universidad de Salamanca (España).  
(\*\*) Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima (Perú).

3. Biotite, smoky quartz and andalusite are specially abundant in the U-bearing tuffaceous layers.
4. The ore minerals consist of massive pitchblende and very scarce Fe sulphides. Due to the intense weathering, gummite and secondary U minerals, mainly phosphates and silicates, predominate in the outcrops and mining works.
5. The pitchblende fills fractures which range from a few centimeters to several meters in length, and from less than 1 mm. to 10 cm. in width. Some of these fractures are subvertical and due to contraction, and coincide with the columnar jointing of the ignimbrites. Others are subhorizontal and parallel to a conjugated, ductile shear joint system which was developed by the compaction and adjustment of the competent layers which host the U mineralizations.

According to these features, a preliminary model to explain the origin of this particular type of U deposits is proposed in this paper.

**KEY WORDS:** Uranium, ignimbrites, Puno, Peru, macusanite, metallogeny.

## Introducción

Los indicios uraníferos de Macusani, los mejor conocidos hasta ahora de los que existen en el Departamento de Puno, en el Perú, constituyen uno de los ejemplos más característicos de mineralizaciones de uranio asociadas con rocas piroclásticas. Sin embargo, dado que este tipo de yacimientos no está todavía bien definido ni desde el punto de vista económico ni metalogénico, su interés, teniendo en cuenta además el precio actual del uranio, es por ahora limitado.

Ultimamente, los trabajos de exploración realizados por el IPEN en las ignimbritas de la meseta de Quenamari han permitido encontrar pechblenda en casi todos los indicios situados en los niveles superiores de la pila volcánica, lo que demuestra que estas mineralizaciones no se deben únicamente a la lixiviación y redeposición del uranio de las rocas piroclásticas por aguas meteóricas, sino al de la oxidación *in situ* de pechblenda filoniana.

Este hecho, aparte de un gran interés científico, tiene un significado mucho más importante: que los minerales de uranio existentes en las rocas piroclásticas de la meseta de Quenamari no son simplemente el resultado de una lixiviación y deposición del uranio por las aguas superficiales, sino el de la oxidación *in situ* de una pechblenda filoniana. Con ello, independientemente del origen que se pueda atribuir a esta pechblenda, se demuestra la importancia que, desde un punto de vista económico, tienen las mineralizaciones de Macusani.

Actualmente, como consecuencia de los trabajos de exploración realizados por los geólogos del IPEN, se ha podido comprobar que estos indicios tienen unas características petrológicas, mineralógicas y metalogénicas singulares (Arribas y Figueroa, 1985) que permiten afirmar dos cosas: primero, que estas mineralizaciones constituyen uno de los mejores ejemplos encontrados hasta hoy de yacimientos de uranio relacionados con rocas volcánicas ácidas; segundo, que por su ley y condiciones de yacimiento, los indicios de la Meseta de Quenamari pueden conducir

al descubrimiento de mineralizaciones de uranio de importancia fuera de lo común, incluso a escala mundial.

## Geología regional

El distrito uranífero de Macusani está situado al noroeste de la provincia de Carabaya (fig. 1), en el Departamento de Puno, en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, constituida aquí por materiales fundamentalmente paleozoicos. Estos materiales fueron pegados por la orogenia hercínica y afectados posteriormente por los mismos procesos tectónicos andinos que dieron lugar a la formación de la Cordillera Occidental durante el Mesozoico y Cenozoico (Bellido y Montreuil, 1972; Bellido, 1982).

A finales del Mioceno, la superficie Puna, una penillanura desarrollada entre 2.000 y 2.500 metros sobre el nivel del mar, se levantó hasta altitudes comprendidas entre 4.000 y 4.500 metros por el juego de grandes fallas longitudinales. Los relieves originados por estos procesos tectónicos fueron fosilizados por potentes series de sedimentos lacustres y rocas piroclásticas, especialmente ignimbritas, entre ellas las de las mesetas Picotani y Quenamari, las cuales se extienden por el Altiplano y el borde occidental de la Cordillera Oriental (fig. 2).

Durante el Cuaternario, el relieve fue retocado por una intensa erosión glacial (lám. 1 A y D) y recubierto, en gran parte, por nuevos conos fluvio-glaciares provenientes de los nevados de la Cordillera Oriental, entre ellos el Allincápac, Queroni y San Francisco, situados en las proximidades de Macusani, y que alcanzan alturas próximas a los 6.000 metros.

Las formaciones volcánicas pliocuaternarias en las que se encuentran los indicios uraníferos estudiados en este trabajo están situadas en la meseta de Quenamari, al oeste de Macusani, y a altitudes que llegan a sobrepasar los 5.000 metros, en una región drenada ya por la red hidrográfica del Amazonas.

En el caso de Macusani, las anomalías uraníferas

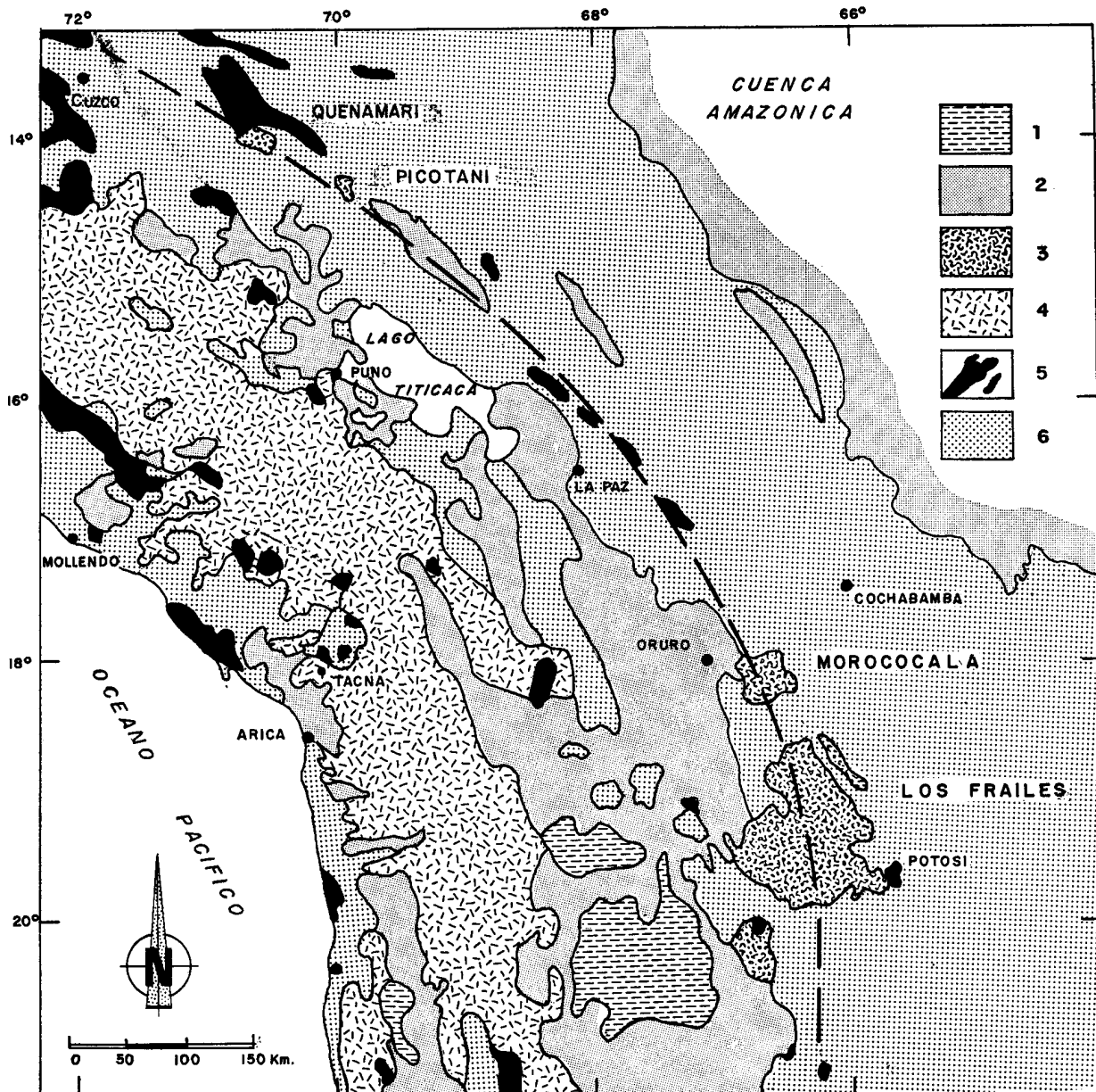


Fig. 1.—Las cuencas de Quenamari y Picotani, en Perú, y Morococala y Los Frailes, en Bolivia, en las que se encuentran las ignimbritas que contienen mineralizaciones de uranio tipo Macusani, están situadas sobre un arco paralelo a las principales estructuras tectónicas andinas (1. Depósitos salinos; 2. Cuaternario; 3. Ignimbritas y tobas riódacíticas plio-cuaternarias tipo MACUSANI; 4. Volcanitas cenozoicas; 5. Granitoides; 6. Precámbrico a Terciario).

corresponden a filoncillos de pechblenda masiva, casi totalmente oxidados en superficie, situados en los niveles superiores de las rocas piroclásticas — tobas aglomeráticas, lapílicas y cineríticas, especialmente las segundas — que rellenaron la gran depresión tectónica situada entre los ríos Macusani y San Gabán, al este, y Corani, al norte, en una zona delimitada

por las localidades de Macusani, Tantamaco, Chacaconiza y Chullopampa. La estructura tectónica en la que se encuentra esta depresión se extiende, de forma discontinua y a lo largo de más de 200 kilómetros, desde Macusani a Cojata, siguiendo una línea más o menos paralela al Lago Titicaca y la costa del Pacífico, y en la que se encuentran situa-

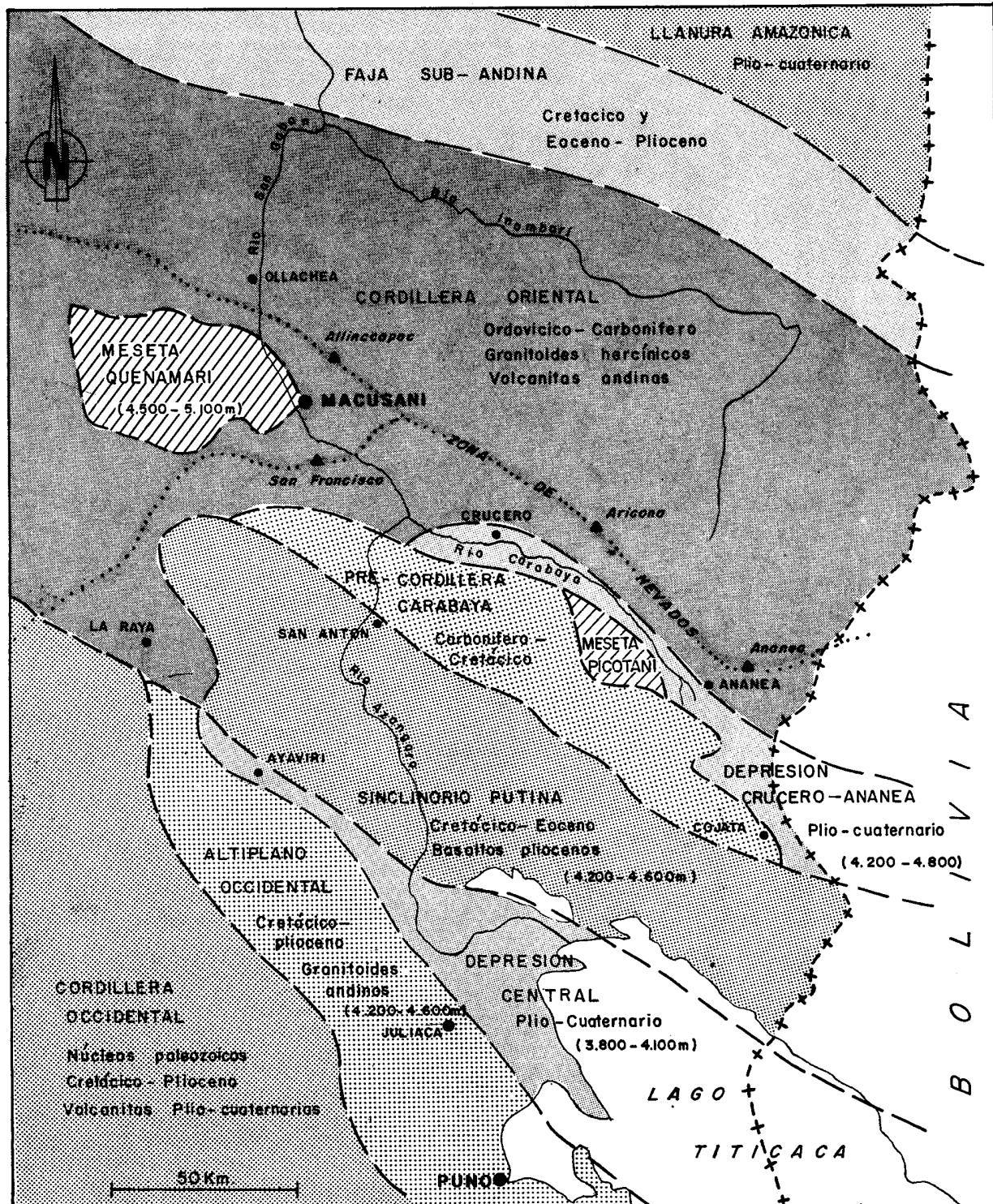


Fig. 2.—Esquema geológico-estructural de la región noroeste del lago Titicaca. Las mesetas de Quenamari y Picotani, donde se encuentran los indicios uraníferos, están formadas por rocas volcánoclasticas pliocenas y por depósitos glaciares y fluvio-lacustres cuaternarios.

das también las ignimbritas de Picotani, Morococala y Los Frailes, estas últimas en Bolivia (fig. 1).

### Estratigrafía

Las formaciones sedimentarias del Distrito de Macusani están constituidas principalmente por los materiales paleozoicos, concretamente del Carbonífero y Permotriás, que forman el basamento, y los depósitos cuaternarios —lacustres, glaciares y fluviales— que cubren tanto a aquéllos como a las rocas piroclásticas pliocuaternarias en las que se encuentran precisamente las mineralizaciones uraníferas. A continuación, se resumen las principales características litoestratigráficas de estas formaciones.

### MATERIALES PALEOZOICOS

#### *Formación Ananea*

Está constituida por una potente serie de lutitas negras, grises, verdosas y marrones que tiene areniscas y cuarcitas intercaladas, y aspecto flyschoides. En esta formación, que aflora al sur de la depresión de Macusani, se incluyen sedimentos indiferenciados del Devónico y Silúrico, correspondientes los primeros al Grupo Excelsior, que afloran en numerosos puntos de la zona situada al norte del Lago Titicaca, entre el Abra de la Raya, en la carretera de Ayaviri, al oeste de Macusani, y la frontera boliviana.

#### *Formación Ambo*

Aflora en numerosos puntos de la Cordillera Oriental, entre Macusani y Cojata (lám. 1 A). En las proximidades de Macusani, la formación Ambo está constituida, en la base, por cuarcitas con niveles de dolomías; en la zona media, por lutitas y cuarcitas negras, de aspecto flyschoides, y areniscas; y en la parte alta, por lutitas negras con niveles de microconglomerados y abundantes restos de plantas.

#### *Grupo Copacabana*

Comprende la parte alta del Pensylvaniense y la inferior del Pérmico, y da lugar a pequeños afloramientos en la vecindad de Macusani y el cauce del río San Gabán. En esta zona, los materiales del Grupo Copacabana consisten en bancos de areniscas y lutitas verdosas alternantes con calizas negras silicificadas, las cuales llevan intercalados niveles de sílexitas, calizas arenosas y margas grises. Algunas de las pizarras verdosas, concretamente las de la zona situada entre Chacoconiza y Occacaja, corresponden en realidad a tobas andesíticas muy alteradas.

#### *Grupo Mitu*

Las rocas permo-triásicas del Mitu, consistentes en una alternancia de materiales volcánico-sedimentarios y detríticos, estos fuertemente rojizos y a veces con algas marinas, son los principales componentes del basamento de la cuenca de Macusani (lám. 1A). Las formaciones detríticas incluyen arenas, lutitas, brechas y conglomerados, constituidos éstos por fragmentos de cuarcitas, esquistos, calizas y chert. Los depósitos volcánicos consisten en coladas de espilitas y andesitas en las que hay intercalados niveles de ignimbritas, riolitas y dacitas, y otros formados por estas mismas rocas erosionadas y redepositadas.

### MATERIALES CUATERNARIOS

En la meseta de Macusani, el Cuaternario está representado por los depósitos morrénicos y fluvio-glaciares acumulados en los amplios valles excavados en las rocas piroclásticas. En sus partes terminales, estas formaciones pasan paulatinamente a los materiales lacustres y aluviales que rellenan las depresiones interandinas y dan lugar a las extensas pampas del Altiplano.

### Rocas volcánicas

Las vulcanitas de la cuenca de Macusani tienen un carácter eminentemente ácido, peraluminoso, y están constituidas fundamentalmente por rocas piroclásticas de tipo «sillar», es decir, por ignimbritas riolíticas y riolíticas, no soldadas, pero más o menos compactadas por recristalización durante el enfriamiento.

Los materiales piroclásticos ocupan una superficie que sobrepasa los 2.000 kilómetros cuadrados, son subhorizontales, o bien presentan buzamientos comprendidos entre 5° y 20° al noreste, aunque en ocasiones lo hacen en sentido contrario, especialmente en el borde oriental de la cuenca. Ocasionalmente contienen niveles de «lahars» y paleocanales, formados por arcillitas y sedimentos volcanoclasticos en los que hay intercalados algunos niveles de conglomerados.

En su mayor parte, las ignimbritas son de color blanco o ligeramente grisáceo, masivas y de diferente compacidad, lo que depende fundamentalmente del grado de consolidación de la matriz (lám. 1 A a F). Las que se encuentran sobre la formación Ambo, entre Chacoconiza y Occacaja, están más soldadas y tienen los fragmentos líticos y las vesículas aplastadas y dispuestas en una matriz microcristalina que posee textura fluidal. Otras veces, la matriz cinerítica está constituida por una gran cantidad de partículas de vidrio sueltas, por lo que la roca tiene textura terrosa y, en algunos casos, fractura concoidea. Además, intercalados en estos niveles, hay otros de composición semejante, pero de carácter aglomerático, con litoclastos que pueden medir desde unos milímetros a varios centímetros, y que contienen incluso bloques y bombas volcánicas.

Por lo que se refiere a las tobas lapílicas, son éstas las que presentan una disyunción columnar mejor definida (lám. 1C) y en las que, en casi todos los casos, se encuentran las mineralizaciones uraníferas. Macroscópicamente se trata de tobas cristalovitreas (lám. 3A), pseudoestratificadas y con frecuente estructura brechoidea, concretamente cuando aumenta la proporción de fragmentos líticos, en cuyo caso pueden clasificarse como tobas lítico-cristalinas. De la misma forma, en aquellas ocasiones en las que aumenta notablemente la matriz afanítica (lám. 3B), las tobas se pueden clasificar como vítreocristalinas.

Al microscopio, las tobas tienen textura porfiro-

clástica, lo que se debe a la forma angulosa que posee la mayor parte de sus componentes, cuyas características mineralógicas se indican a continuación.

### Composición mineralógica

#### Cuarzo

Cristales angulosos o subredondeados, generalmente fracturados, agrietados y corroídos por la matriz (lám. 3A). Contienen frecuentes inclusiones de apatito, silimanita y moscovita. A destacar que, en las marcas encajantes de las mineralizaciones uraníferas, la mayor parte de los cristales de cuarzo son ahumados, bipiramidales y con escasas inclusiones fluidas (lám. 2B). Además, como calcedonia fibrosa o esferulítica, el cuarzo rellena las fisuras o cavidades de la matriz. Algunas veces, los huecos de esta última están tapizados por tridimita.

#### Feldespatos potásicos

Hay sanidina y ortosa, esta última siempre subordinada a la primera y algo alterada. La sanidina forma cristales idiomorfos o subidiomorfos que están generalmente fracturados (lám. 3A) y pueden contener hasta el 25% de albita.

#### Plagioclasas

Se trata normalmente de oligoclasa (25 an) idiomorfa a subidiomorfa, frecuentemente zonada, en cuyo caso la parte externa puede llegar a ser albita, y con inclusiones de micas, circón y apatito. Ocasionalmente forma cristales mixtos con los feldespatos potásicos (lám. 3B).

#### Biotita

Cristales desflecados de color pardo a pardo oscuro que a veces llegan a alcanzar hasta un centímetro de sección. En algunas raras ocasiones, la biotita está cloritizada o desferriificada, pasando a moscovita. Sólo presenta inclusiones de apatito o de cristales opacos (lám. 3B), siendo de destacar que la biotita es siempre muy abundante en las rocas encajantes de los indicios uraníferos. La relación  $Fe/Fe + Mg$  es 0.75.

#### Moscovita

Rara como mineral primario, cuando tiene este carácter forma láminas grandes (lám. 3A). A veces es de tipo lepidolítico y la portadora del litio (200 ppm) de las tobas. Frecuentemente es secundaria, bien sea por transformación de las plagioclasas o la biotita.

#### Andalucita

De color rosado, fuertemente pleocroica, de rojizo a verdoso claro (lám. 3B), forma cristales prismáticos, aciculares, idiomorfos o fragmentados, que excepcionalmente pueden llegar a medir dos centímetros de longitud. En algunos casos, la andalucita está asociada con silimanita, biotita y plagioclasas en lo que parece corresponder a coronas de reacción sobre xenolitos pelíticos.

#### Minerales accesorios

Los más frecuentes son apatito, topacio, turmalina, silimanita, circón, rutilo e ilmeneo-rutilo, así como magnetita y pirita, que aparecen como inclusiones o están diseminados en la matriz. Ninguno de ellos presenta características especiales, si bien hay que destacar la presencia de espinelas entre los minerales que reemplazan a los xenolitos.

#### Litoclastos

Si bien los fragmentos líticos más abundantes son los de las propias rocas volcánicas, las tobas contienen frecuentemente pequeños fragmentos de lutitas, más o menos silicificadas, y cuarcitas arrancadas del basamento, probablemente de la formación Ambo. La abundancia de estos xenolitos podría explicar, en parte, el alto contenido en aluminio de las rocas piroclásticas y, en consecuencia, la formación de andalucita, silimanita y espinelas.

La matriz de las tobas está constituida por un vidrio cuarzo-feldespatico, frecuentemente vesicular, que se ha desvitrificado parcialmente y dado lugar a la aparición de halloysita, montmorillonita y otros minerales de la arcilla (lám. 3B). Este proceso de desvitrificación es más intenso en el borde de las partículas de vidrio, donde los minerales de la arcilla crecen paralela o perpendicularmente a los bordes.

La matriz muestra en ocasiones texturas esferulíticas y fluidales, y contiene microlitos de feldespato e inclusiones de sílice micro y criptocristalina. En general, se trata de cenizas volcánicas poco compactadas, por lo que las rocas volcánicas tienen una gran porosidad. Debido a ello, las rocas encajantes de los filoncillos de pechblenda, los cuales están casi totalmente oxidados cerca de la superficie, aparecen impregnadas por minerales secundarios de uranio, especialmente autunita, cuyos cristales están diseminados en los feldespatos alterados o forman agrupaciones fibroso-radiales en la matriz que rodea a los litoclastos y fragmentos de cuarzo volcánico.

Finalmente, hay que destacar la existencia en la serie volcánica de algunos niveles formados fundamentalmente por esquirlas y fragmentos de vidrio que constituían (lám. 2F) tabiques de vesículas de gas, lo que refleja la gran riqueza en volátiles del magma riolítico y riolodácico que dio origen a las ignimbritas de Quenamari.

A esta misma causa se puede atribuir la presencia de macusanita (Barnes *et al.*, 1969), un tipo de obsidiana que hasta ahora sólo se había encontrado como cantos, aparentemente rodados, en el cauce de algunos ríos del área de Macusani, concretamente el Chilcuno Chico (lám. 3E). Estos vitrófilos, que conservan exteriormente unas marcas peculiares, originadas probablemente por el desprendimiento de volátiles, parecen corresponder a fragmentos explosivos de un nivel de lava acumulado en la cámara magmática o en los conductos volcánicos, y que quedaron incluidas entre las rocas piroclásticas después de la explosión.

La macusanita contiene casi siempre, y orientados por el flujo, los mismos cristales de andalucita que se encuentran en las tobas, muy especialmente en las que sirven de caja a las mineralizaciones de uranio (lám. 3F). Por otro lado, dado el parecido que existe entre la composición química de las tobas y el vitrófido, se puede pensar que la macusanita es el resultado de la fusión parcial de aquéllas a una temperatura que no llegó a alcanzar la de la andalucita.

#### Caracteres geoquímicos

La composición química y mineralógica de las rocas encajantes de las mineralizaciones uraníferas (tabla 1) indica que las ignimbritas de Macusani tienen un origen claramente cortical. El magma peraluminoso se originó probablemente por fusión anatécica de materiales del zócalo, especialmente pelíticos, a baja presión de agua y a temperaturas comprendidas entre 700° y 750°C, acordes con el campo de estabilidad de la silimanita. Posteriormente, los productos de la fusión habrían ascendido hasta niveles relativamente superficiales —probablemente inferiores a tres kilómetros, dada la presencia simultánea

TABLA 1  
Análisis químico de rocas de Macusani, Puno (Perú)

Mayores	Ignimbritas*	Obsidiana**	Trazas	Ignimbritas*	Obsidiana**
SiO <sub>2</sub> ... ..	70.95%	73.00%	Ba ... ..	200 ppm	30 ppm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ... ..	14.70	15.60	Cs ... ..	70	340
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ... ..	1.45	0.65	Sn ... ..	50	280
MnO ... ..	0.05	0.06	W ... ..	<5	200
MgO ... ..	0.32	0.04	Rb ... ..	750	2.000
CaO ... ..	1.62	0.30	Sr ... ..	100	10
Na <sub>2</sub> O ... ..	3.50	4.10	Pb ... ..	50	80
K <sub>2</sub> O ... ..	4.90	3.90	As ... ..	30	200
TiO <sub>2</sub> ... ..	0.26	0.20	Zn ... ..	120	120
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ... ..	0.45	0.53	Cu ... ..	40	30
M. V. ... ..	1.78	1.33	Ni ... ..	50	30
			Li ... ..	200	1.500
<i>Total</i> ... ..	99.88	99.71	B*** ... ..	300	3.000
			U ... ..	10.2	6.8
			Th ... ..	3.7	3

\* Valor medio de 26 muestras de Pinocho y Chilcuno.

\*\* Macusanita, Chilcuno Chico.

\*\*\* Según Barnes *et al.* (1969).

de moscovita y andalucita en el magma riolítico— en los que se habría producido una fuerte diferenciación. Esto habría dado lugar a un enriquecimiento en Na, P, Rb, Cs y Sn, y empobrecimiento en Fe, Mg, Ca y Sr como consecuencia de la abundancia de volátiles, tal y como parece indicar el alto contenido en B y Li de la *macusanita*, representante muy evolucionado del magma que dio origen a las rocas piroclásticas.

### Tectónica

En el sureste del Perú, el basamento paleozoico sobre el que se depositaron las rocas piroclásticas que contienen los indicios uraníferos ha sufrido los efectos de dos fases de deformación hercínica (Audebaud *et al.*, 1973). La más antigua, la eohercínica, se produjo durante el paso del Devónico al Carbonífero, y dio lugar a pliegues acompañados por una esquistosidad de fractura en los niveles pelíticos. Esquistosidad que, ocasionalmente, puede llegar a ser de flujo según planos axiales subverticales. La segunda fase, la tardihercínica, se desarrolló a mediados del Pérmico, y dio lugar a la discordancia existente entre las deformaciones permocarboníferas y permotriásicas del Grupo Mitu. Esta discordancia desaparece hacia el oeste, en el Cuzco, en donde sólo están bien definidos los pliegues eohercínicos, los cuales tienen un estilo muy diferente al que impera en los bloques andinos, y son, en la mayoría de los casos, los únicos que se observan en el Paleozoico superior.

Más tarde, fueron principalmente los materiales

mesozoicos y cenozoicos de la Cordillera Oriental los que resultaron afectados por la orogenia andina, la cual, al actuar sobre el basamento hercínico, produjo en éste grandes fracturas longitudinales que alcanzaron su máximo desarrollo durante el Cenozoico y dieron lugar a la tectónica de bloques que domina en la zona. Esta fracturación permitió la salida de las lavas y los materiales piroclásticos pliocuaternarios que rellenaron las depresiones interandinas, y en los que se encuentran precisamente las mineralizaciones de uranio. Por último, ya en el Cuaternario, la tectónica más reciente está representada por una fracturación que afecta incluso a las mineralizaciones de uranio (lám. 1B) y a favor de la cual se han excavado los valles que, en dirección más o menos paralela a los ríos Corani y Macusani, disecan la meseta de Quenamari.

Por lo que se refiere a la tectónica propia de las rocas volcánicas, hay que señalar la presencia en ellas de dos tipos principales de fractura, uno subvertical y otro subhorizontal, que han tenido gran importancia en el control de la mineralización y que se han producido como consecuencia de la contracción que tuvo lugar durante la consolidación de las rocas piroclásticas (lám. 1C).

El sistema subvertical es paralelo a las diaclasas de enfriamiento que dieron lugar a la disyunción columnar dominante en los niveles más compactados de las ignimbritas, entre ellos, el superior, que es donde se encuentra la mayoría de los indicios uraníferos, especialmente los que contienen los minerales primarios (lám. 1F). El sistema subhorizontal está constituido, a su vez, por fracturas conjugadas



que, con buzamiento variable entre 5° y 15°, son paralelas a un sistema de cizalla dúctil que se desarrolló por la sucesiva compactación y distensión, y posterior asentamiento, de los diferentes materiales que constituyen la pila volcánica (lám. 2A).

A la apertura de este segundo tipo de fracturas pudo contribuir también el diferente comportamiento a la compresión de las rocas piroclásticas, menos compactadas, que están situadas por debajo del nivel mineralizado. Así, de forma análoga a lo que ocurre en algunas series alternantes de lavas y tobas basálticas, la diferente competencia de aquellos materiales habría desencadenado tensiones en el nivel superior, lo que habría provocado la apertura de las fracturas subhorizontales y permitido la circulación de los fluidos que dieron lugar a la alteración de las rocas piroclásticas y a la deposición de los minerales primarios de uranio.

### La mineralización

Las mineralizaciones de Macusani, aunque semejantes por la naturaleza de sus rocas encajantes a algunas de las que se han descubierto en rocas piroclásticas en otras partes del mundo (Goodell y Aaron, 1981), muestran ciertas características petrológicas y estructurales que les hacen ser, por el momento, únicos en su género. Por esta razón, y sobre todo porque se trata de un tipo metalogénico que, por su interés económico, puede conducir al descubrimiento de importantes yacimientos de uranio, se describen a continuación las características más importantes de la mineralización y las gangas.

### Minerales hipogénicos

La pechblenda es el mineral primario de uranio en todos los principales indicios descubiertos hasta ahora en la Meseta de Quenamari —Pinocho, Chilcuno Kijitian, Calvario y Chapi—, y si bien la presencia de este mineral era predecible porque en todos los indicios importantes se habían encontrado gummitas, el descubrimiento de la pechblenda, generalmente muy oxidada, no se realizó hasta 1982 en Pinocho (lám. 1E). En cualquier caso, la confirmación de la existencia de minerales hipogénicos de uranio es importante no sólo por el hecho en sí, sino por la extraordinaria espectacularidad de los indicios, ya que las vetas de pechblenda masiva pueden llegar a tener hasta 10 centímetros de potencia (lám. 1B) y varios metros de longitud (lám. 1F).

Salvo que está muy oxidada la pechblenda tiene un aspecto normal, tanto a simple vista como al microscopio. No obstante, se debe destacar que, en Calvario, existen magníficos ejemplares de pechblenda ahora completamente pseudomorfizados por gummitas amarillas y autunita (lám. 2E), que consisten en agregados botroidales cuyos esferulitos pueden medir más de dos centímetros de diámetro. Estos esferulitos están cubiertos por otros más pequeños, pero sin que, por su avanzado estado de alteración, se pueda afirmar la existencia de crecimientos sucesivos.

En algunos indicios, p. e., en Chapi, donde la pechblenda rellenó masivamente las fracturas de las rocas piroclásticas (lám. 1F), la textura de las gummitas y la disposición de los

minerales secundarios de uranio permite reconocer fácilmente las formas concrecionadas de los minerales primarios.

Al microscopio, la pechblenda aparece fuertemente alterada, por lo que presenta dureza y poder reflector bajos (lámina 3C). En realidad, se trata casi siempre de gummitas negras en las que quedan restos de parapechblenda y de los escasos sulfuros de hierro que acompañaban a los minerales primarios, así como trazas de las formas segmentadas producidas por las fisuras de contracción radiales y concéntricas.

Por lo que se refiere a los sulfuros de hierro, son la pirita y menilcovita los únicos que, aunque en muy pequeña cantidad, acompañan a los minerales primarios de uranio. Ellos se presentan bajo dos aspectos (lám. 3C y D):

- Diseminados en la pechblenda, formando pequeñísimas inclusiones puntuales o agregados de textura framboidea.
- En películas y placas que tapizan o rellenan los huecos que dejan entre sí los esferulitos de pechblenda.

Aparte de los sulfuros, no se han encontrado hasta ahora otros minerales acompañantes de la pechblenda. Sin embargo, teniendo en cuenta el Ca que debieron dejar libre las plagioclasas como consecuencia de la alteración hidrotermal sufrida por las rocas volcánicas, es de prever que la calcita, junto con los sulfuros de hierro, sea también un componente de la ganga en las zonas no meteorizadas de estos yacimientos. Además, en algunos indicios muy alterados y próximos a la superficie, p. e., en Chilcuno VI, la pechblenda va acompañada por un producto criptocrystalino de naturaleza sílico-arcillosa que rellena las fracturas mineralizadas, y que se debe probablemente al arrastre y deposición de la sílice y los minerales de la arcilla producidos por la desvitrificación de la matriz de las rocas volcánicas.

En cualquier caso, la fuerte alteración sufrida por los minerales primarios cerca de la superficie, y la falta de labores mineras, impiden por el momento llevar a cabo un estudio más detallado. Ahora sólo se puede decir que, dada la escasez de gangas, los minerales primarios —pechblenda y sulfuros de hierro— que se formaron por la deposición rítmica de un gel complejo urano-sulfurado, son, de hecho, los únicos componentes de la mineralización.

### Minerales supergénicos

Como todas las labores de reconocimiento, aún las más avanzadas, se encuentran en la zona de oxidación, los minerales secundarios de uranio —parapechblenda, gummitas y minerales hexavalentes son, por ahora, los principales constituyentes de la mayor parte de la mineralización.

La oxidación de la pechblenda ha conducido a su progresiva transformación en parapechblenda y gummitas negras, naranjas y amarillas, especialmente estas últimas. En este caso, únicamente los tabiques de la limonita que rellenaba las fisuras de retracción de la pechblenda permiten adivinar la textura de los minerales primarios. Por lo que se refiere a la parapechblenda, ésta sólo se ha visto formando pequeñas placas dentro de las gummitas negras, concretamente en aquellas secciones que todavía conservan los sulfuros de hierro inalterados (lám. 3D).

Las gummitas naranjas, también muy raras, se encuentran unas veces en el contacto de las gummitas negras y amarillas, caso de Pinocho, o dentro de las gummitas amarillas, caso de Chapi, donde pseudomorfizan a los esferulitos de pechblenda. Ellas están constituidas por un agregado criptocrystalino de becquerelita y probablemente billietita, la cual, dado que no se ha detectado hasta ahora baritina en la ganga, se habría formado con el Ba (2.000 ppm) de las rocas piroclásticas encajantes.

Las gummitas amarillas son, en la mayor parte de los



casos, los principales constituyentes de la mineralización. Ellas consisten en una asociación micro a criptocristalina de silicatos y fosfatos de uranio, especialmente uranotilo y fosfuranilita, que unas veces tiene textura compacta y brillo vítreo y otras, las más, textura terrosa y brillo apagado (lámina 1E).

En cuanto a los minerales supergénicos, son los silicatos y fosfatos los más abundantes, pues no solo rellenan los poros y tapizan las fracturas, tanto las que contienen a los minerales primarios como las que atraviesan a las tobas en diferentes direcciones (lám. 2A), sino que pseudomorfizan también a las propias gummitas. En este caso, las costras de autunita y meta-autunita, de color amarillo verdoso, tienen, en sección transversal, una textura palmeada, y se disponen radialmente sobre los núcleos de gummita amarilla, a los que sustituyen a veces por completo, pero conservando exteriormente la forma de los esferulitos y otras texturas de la pechblenda (lám. 2E).

Aparte de la autunita (lám. 2B), que es el mineral secundario más frecuente y el único presente en los indicios inferiores de las tobas, p. e., en Chapi Bajo y Kijitian Bajo, los otros minerales hexavalentes encontrados hasta ahora son el uranolito y la fosfuranilita. Estos, además de dispersos en las fisuras, pueden reemplazar o rellenar también las cavidades producidas por alteración de las gummitas.

Por lo que se refiere a los sulfuros de hierro, las pequeñas

inclusiones puntuales y framboidales, y las finas películas de pirita y melnicovita aparecen pseudomorfizadas por los hidróxidos de hierro, por lo que las gummitas amarillas tienen, con frecuencia, textura concrecionada o reticulada, generalmente en forma de panal.

**Los indicios uraníferos**

El estudio de los indicios uraníferos de Macusani se ha podido efectuar gracias a la colaboración prestada por los componentes de la Dirección de Materias Primas del IPEN, los cuales no han regateado esfuerzos para facilitar la visita de todos los afloramientos que, por sus características mineralógicas y petrográficas, representan mejor a los diferentes tipos de mineralizaciones existentes en la zona. Esto ha permitido definir su tipo metalogénico y determinar las que parecer ser, en principio, sus condiciones de formación.

En líneas generales, se puede decir que, salvo las anomalías de Chapi Bajo y Medio, Esperanza y Ki-

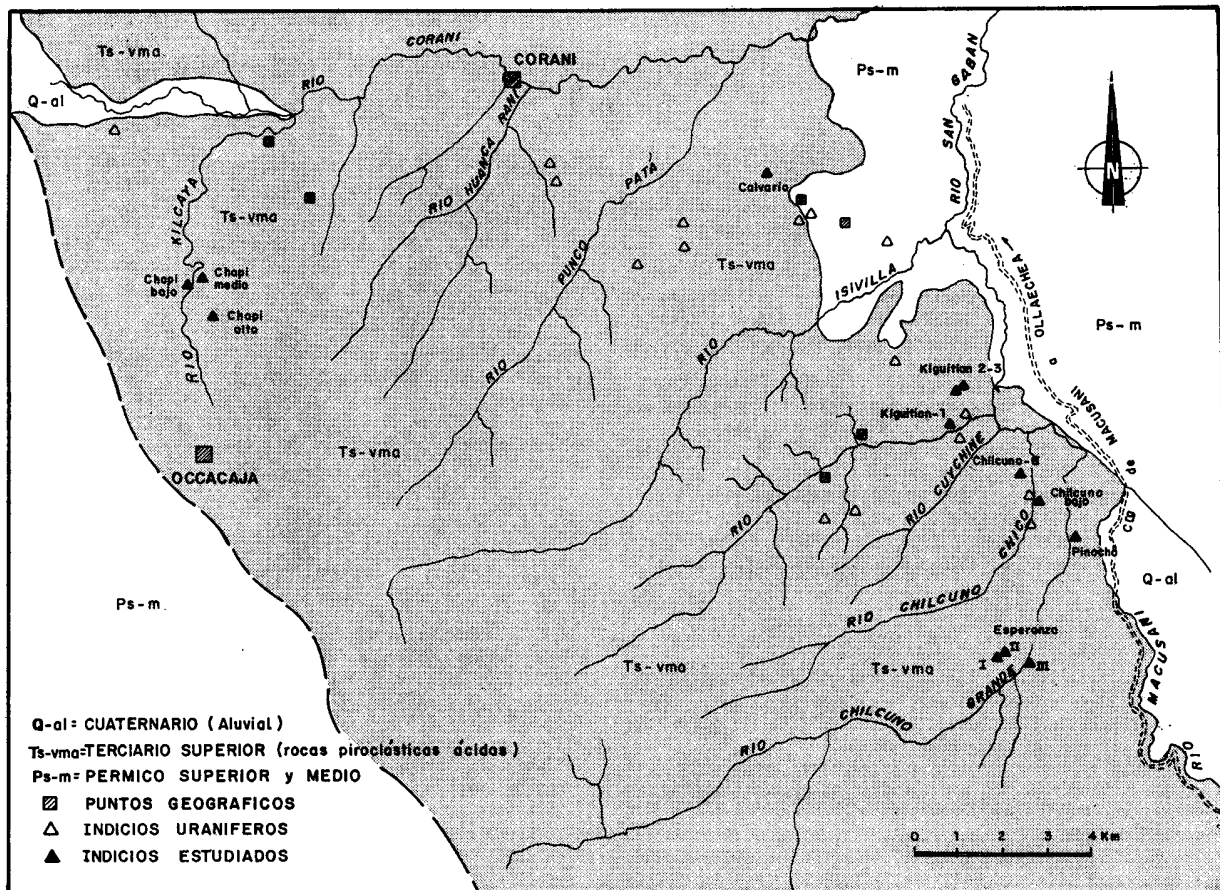


Fig. 3.—Esquema geológico de la parte central del distrito uranífero de Macusani con indicación de los indicios a los que se hace referencia en este trabajo.

jitian Bajo, las mineralizaciones visitadas están constituidas por gummitas amarillas que pseudomorfizan, parcial o totalmente, a la pechblenda, y por fosfatos y silicatos de uranio. Todos estos minerales se encuentran en los dos tipos de fracturas, verticales y subhorizontales, que se han descrito anteriormente. Además, los minerales hexavalentes, especialmente la autunita, tapizan también las fisuras que, sin dirección definida, atraviesan a las rocas donde se encuentran las estructuras que contienen las mineralizaciones primarias.

A continuación se resumen las características litológicas, mineralógicas y estructurales de las principales anomalías (fig. 3).

## Sector oriental

### *Pinocho*

Las rocas encajantes, tobas lapílicas con abundante biotita y cuarzo ahumado, que buzanan unos 10° al suroeste, están atravesadas por fracturas subhorizontales, paralelas al sistema de cizallas conjugadas, con un buzamiento medio de 7°. La mineralización, situada aproximadamente a 4.300 metros de altitud, consiste en pechblenda oxidada y gummitas negras y amarillas, acompaña por autunita, fosfuranilita y uranotilo (lám. 2A).

### *Esperanza*

Estos indicios están situados en la parte alta de las laderas meridional (Esperanza III, 4.350 m.) y septentrional (Esperanza I y II, 4.375 m.) del valle del Chilcuno Grande. Las rocas encajantes son también, como en Pinocho, ignimbritas con abundante biotita y cuarzo ahumado. Sin embargo, en estas anomalías sólo se han encontrado fosfatos y silicatos de uranio, y no se han visto hasta ahora ni gummitas ni restos de minerales primarios.

Por otra parte, en Esperanza I, la distribución de los minerales hexavalentes ha estado controlada no solo por las fracturas subhorizontales sino también por un pequeño paleocauce relleno de materiales volcánoclasticos. Aquí se observa también, muy claramente, el efecto de los procesos neotectónicos, ya que el paleocauce mineralizado está desplazado por una falla paralela al valle del Chilcuno Grande; lo que parece indicar que los ríos de la zona han excavado sus cauces a favor de las estructuras tectónicas más recientes.

### *Chilcuno*

Se encuentran estas anomalías sobre las laderas del río Chilcuno Chico, estando situada la más importante, el espectacular indicio de Chilcuno VI (lám. 1B), en la parte alta de las tobas, a 4.340 metros de altitud.

Las rocas encajantes son, como siempre, ignimbritas tipo *sillar*, con abundante biotita y cuarzo ahumado, atravesadas por fracturas subhorizontales paralelas al sistema de cizallas conjugadas (lám. 2B) en el que se depositaron los minerales primarios. Estos aparecen en los afloramientos completamente pseudomorfizados por gummita amarilla y otros minerales secundarios, especialmente autunita y fosfuranilita (lám. 2A). Las vetas, generalmente paralelas, miden entre un milímetro y 10 centímetros de potencia, y ocasionalmente están desplazadas por las fallas más recientes.

Entre las anomalías de Chilcuno hay que citar la de

Chilcuno Bajo por sus características especiales, ya que está situada en la morrena lateral derecha del antiguo valle glaciar cuyo curso ha seguido después el río. Esa morrena está formada por bloques y cantos del Mitu —entre ellos cuarcitas y rocas volcánicas, estas últimas generalmente muy alteradas— y de las tobas volcánicas de Macusani. Estas rocas provienen, en parte, de los niveles mineralizados, y contienen, por ello, gummitas que se han meteorizado y dado lugar a una dispersión de minerales secundarios de uranio que impregnan a los materiales próximos y dan lugar a fuertes anomalías puntuales. Por esta razón, su interés económico es muy limitado.

### *Kijitian*

También aquí, como en Chilcuno y Chapi, los indicios se encuentran en dos niveles. Los que contienen gummitas, Kijitian II y III, que son los de mayor interés económico, están situados a 4.355 y 4.360 metros de altitud respectivamente, mientras que Kijitian I, formado únicamente por minerales hexavalentes que tapizan las fisuras de las rocas encajantes, está situado unos 200 metros por debajo de los anteriores.

Por lo que se refiere a Kijitian II y III, las rocas encajantes son, como siempre, ignimbritas con abundante biotita y cuarzo ahumado, minerales cuya frecuencia aumenta claramente en las zonas mineralizadas (lám. 2B). Por otra parte, hay que destacar la presencia en Kijitian II de concreciones formadas por autunita y óxidos de manganeso alternantes, especialmente psilomelana, que rellenan las fracturas ocupadas originalmente por los minerales primarios de uranio.

### *Calvario*

Los indicios de Cerro Calvario están repartidos a lo largo de un nivel situado a 4.430 metros de altitud, en la coronación de la pila ignimbrítica que cubre el Mitu en el ángulo noreste de la Meseta de Quenamari, en la confluencia de los ríos Macusani y Corani.

Las gummitas amarillas, que dan lugar aquí a perfectas pseudomorfosis de los esferulitos de pechblenda que crecieron en las geodas de los filones (lám. 2E), rellenan las fracturas —en este caso, tanto las verticales como las subhorizontales— de las tobas, las cuales, como en los casos anteriores, contienen abundante biotita, cuarzo ahumado y andalucita.

## Sector occidental

### *Chapi*

Aquí, al igual que en Kijitian, hay también anomalías en dos niveles, aunque las más importantes, las que contienen gummitas, se encuentran como siempre en el nivel superior, en este caso en Chapi Alto, donde rellenan principalmente fracturas verticales.

Estos últimos indicios están situados aproximadamente a 4.600 metros de altitud, en la coronación de una gran meseta situada al sur del río Chapi, una zona de gran belleza por la acción combinada del hielo, agua y viento sobre las tobas, con disyunción prismática, de la meseta de Quenamari (lámina 1D).

Las rocas encajantes son también ignimbritas con abundante biotita, cuarzo ahumado y andalucita (lám. 1F). Sin embargo, la mineralización consiste aquí en vetas de pechblenda masiva, ahora completamente transformada en gummitas amarillas, con algunos restos de gummitas naranjas, que rellenan fracturas prácticamente verticales, paralelas y

dirigidas al noreste. Las vetas tienen de un milímetro a siete centímetros de potencia, sin que se hayan observado hasta ahora, como ganga, otros minerales que no sean algunos escasos sulfuros de hierro coloidales, especialmente melnicovita, y productos arcillosos de alteración. El aspecto de estas anomalías, ocupando fracturas paralelas que pueden alcanzar varias decenas de metros de longitud, así como su alta ley, hace de los indicios de Chapi un caso extraordinario entre las mineralizaciones de uranio a escala mundial.

Por lo que se refiere a los indicios de Chapi Bajo y Medio, situados en el cauce y a media ladera del valle del río Chapi, éstos tienen un interés muy reducido, tanto desde el punto de vista metalogénico como económico. Consisten únicamente en minerales secundarios de uranio, especialmente autunita, que tapizan las fisuras verticales de los aglomerados volcánicos situados en la base de las ignimbritas lapílicas y cineríticas.

Los indicios de Chapi Bajo y Medio podrían ser, como en el caso de Kijitian Bajo y otras anomalías de menor importancia que se encuentran en los valles de los ríos Chilcuno Chico y Grande, por debajo de los indicios con minerales primarios, el resultado de la lixiviación y el transporte por las aguas meteóricas del uranio contenido en los niveles altos, y de la deposición de este último en el punto de surgencia de los acuíferos que se originan cuando cambian la estructura y naturaleza de las rocas volcánicas de la serie de Macusani.

También aquí, como ocurre en alguno de los indicios del Sector Oriental, es evidente el efecto de la neotectónica sobre las mineralizaciones de uranio. En este caso, los desplazamientos verticales han dado lugar a la aparición de estrías de falla en los hastiales de los filones de gummita, lo que indica que estos movimientos se han producido muy recientemente, es decir, cuando los minerales primarios estaban ya oxidados.

### Origen de la mineralización

El estudio petrográfico y mineralógico de los indicios uraníferos de Macusani y sus rocas encajantes demuestra que las rocas piroclásticas son al mismo tiempo las portadoras y receptoras del uranio. Esta conclusión deriva de las siguientes observaciones:

- a) Los minerales primarios sólo se han encontrado hasta ahora en la parte superior de la serie volcánica, en un nivel constituido por ignimbritas de grano medio a grueso y que contiene abundante biotita y cuarzo ahumado.
- b) Este nivel es análogo a otros que aparecen intercalados en la serie volcánica y que muestran también una clara disyunción columnar y un comienzo de desvitrificación de la matriz. Esta contiene, además de los componentes normales —cuarzo, feldespatos, biotita y algo de moscovita—, abundantes litoclastos de lutitas paleozoicas y permotriásicas, y frecuentes cristales idiomorfos de andalucita; mineral que se formó probablemente como consecuencia de la abundancia de alúmina en el magma riolítico a causa de la incorporación de las rocas pelíticas, o a causa de los procesos de diferenciación.
- c) La paragénesis uranífera es siempre la misma en

todos los indicios, y se caracteriza por una asociación *pechblenda-sulfuros* de hierro análoga a la que se encuentra en muchos granitos hercínicos europeos. La *pechblenda* es masiva y hasta ahora, salvo por lo que se refiere a los óxidos de Mn, no parece ir acompañada por otras gangas.

- d) Aparte del control litológico y mineralógico, existe otro estructural, ya que los minerales primarios de uranio se han depositado en las fracturas verticales y subhorizontales originadas por los procesos de enfriamiento, consolidación y asentamiento de la serie volcánica.
- e) La edad relativamente reciente de las rocas piroclásticas de la Meseta de Quenamari, 4,2 m. a. (Barnes *et al.*, 1969), es del mismo orden que la obtenida para las ignimbritas de la Meseta de los Frailes, en Bolivia, de análoga composición, y que contiene también mineralizaciones de uranio, p. e., las de Cotaje (Aparicio, 1981).
- f) Es de destacar que estas dos formaciones volcánicas pliocuaternarias, junto con las que constituyen las Mesetas de Picotani, en Perú, y Morococala, en Bolivia, de edad y composición semejantes, están alineadas sobre un gran arco tectónico que, a lo largo de las cordilleras Oriental y Real, sigue una dirección paralela a la depresión central del Altiplano.
- g) En la proximidad de la superficie los indicios uraníferos han sufrido una fuerte meteorización. Ello ha dado lugar a la formación de gummitas amarillas que pseudomorfizan parcial o totalmente a la *pechblenda*, y al desarrollo de minerales secundarios de uranio que tapizan las fisuras o rellenan los huecos de las rocas encajantes.

Todos estos factores indican la existencia de una estrecha relación entre, por un lado, los indicios uraníferos que contienen minerales primarios y, por otro, la naturaleza de las rocas volcánicas y la presencia en ellas de fracturas abiertas durante los procesos de consolidación.

Desde el punto de vista metalogénico, estos factores parecen demostrar que el uranio se concentró en determinados niveles de la serie ignimbrítica al tiempo que se depositaban los minerales que constituyen actualmente las rocas encajantes de las mineralizaciones de Macusani; lo que, por otra parte, viene a confirmar que las rocas piroclásticas de tipo riolítico y riodacítico, soldadas o no, constituyen un importante metalotecto del uranio (Goodell y Waters, 1981). En este caso, sólo quedaría por explicar cómo el uranio ha podido ser movilizado, transportado y depositado en las fracturas de las tobas para dar lugar a concentraciones explotables.

Una posibilidad sería admitir que el uranio estaba contenido en las cenizas y esquirlas de la matriz, las cuales, al desvitrificarse, habrían expulsado aquel elemento y permitido su transporte por el agua liberada durante la recristalización hasta depositarlo en las fracturas o en cualquier otra trampa, p. e., paleosuelos o niveles alterados y porosos, susceptible de retener el uranio. El bajo contenido de este elemento en las tobas encajantes, alrededor de 10 ppm., y la alteración hidrotermal que localmente presentan las rocas de caja, atribuible a un proceso de tipo deutérico, sirven de apoyo a esta hipótesis.

Sin embargo, las extraordinarias concentraciones de pechblenda masiva que caracterizan a estos yacimientos no se pueden explicar fácilmente por un simple proceso de desvitrificación. Por un lado, porque éste parece ser sólo incipiente en muchas de las rocas de Macusani, y, por otro, porque de ser la desvitrificación el factor principal para la liberación del uranio el fenómeno habría sido más general y serían más numerosos los yacimientos de esta clase.

Por ello, si los minerales de las ignimbritas no han sido los portadores del uranio, quizá sea más fácil admitir que el nivel de rocas piroclásticas en el que se encuentran los yacimientos de Macusani se originó a partir de un magma rico en fluidos uraníferos que quedaron atrapados en la matriz. Mas tarde, avanzada la consolidación y sellada la pila volcánica por el enfriamiento de su parte externa, se creó un sistema geotérmico que, al abrirse las fracturas de contracción, tanto las subverticales como las subhorizontales de cizalla dúctil, permitió a los fluidos residuales, ricos en uranio, circular por ellas y depositar, ya a baja temperatura, la pechblenda y los sulfuros de hierro coloidales que constituyen la mineralización. Es decir, que el proceso metalogénico habría sido semejante al que dio lugar a algunas de las mineralizaciones filonianas que se encuentran en las calderas volcánicas del Terciario y Cuaternario de Lakeview (Oregón), McDermitt (Nevada) y Marysvale (Utah), en los Estados Unidos, y en los volcanes Vulsini (Lazio), en Italia, así como en otras formaciones volcánicas más antiguas, tales como las proterozoicas y paleozoicas de Makkovik (Labrador), Rexpax (Columbia Británica) y Mount Pleasant (New Brunswick), en Canadá; Maureen (Queensland), en Australia; y Novazza (Bérgamo), en Italia (Goodell y Waters, 1981).

En Macusani, al igual que en muchos de los casos citados, los yacimientos de uranio se pueden considerar como exhalativos y sinvolcánicos, es decir, debidos a soluciones hidrotermales de tipo deutérico, cargadas de volátiles, que circularon por las rocas volcánicas durante los últimos estadios de su consolidación. En cuyo caso, de haber sido este el origen, tal y como parecen indicar los datos obtenidos hasta la fecha, el uranio habría sido transportado en es-

tado hexavalente, como complejo clorurado o bicarbonatado, y reducido y precipitado, en forma de pechblenda, por la presencia de  $\text{CO}_2$  y/o  $\text{SH}_2$ . De esta forma, como consecuencia de la liberación del Ca de las plagioclasas durante la alteración hidrotermal de las rocas volcánicas, es de esperar que sea la calcita, junto con los sulfuros de hierro, la ganga más abundante en las zonas no meteorizadas de estos yacimientos. Además, la precipitación de todos los minerales filonianos podría haber estado regulada por los cambios de pH, Eh y la temperatura en la zona de mezcla de los fluidos hidrotermales con las aguas subterráneas, probablemente muy abundantes en una zona que podía estar sometida ya, en esos momentos, a la acción de procesos glaciares.

En cualquier caso, dadas las analogías existentes entre las rocas volcánicas de Macusani y las anteriormente citadas, así como con algunas otras más próximas y que pertenecen también al modelo de caldera resurgente (Curry, 1981), tales como las de la meseta de Los Frailes (Kari-Kari), en Bolivia, también con anomalías uraníferas, y la de Cerro Galán, en Argentina (Francis, 1983), situadas prácticamente sobre el mismo arco volcánico en la Cordillera Oriental de Los Andes, cabe preguntarse si no será también Macusani una estructura de esta clase.

En principio, y sin que se pueda afirmar nada en concreto en tanto no se conozca bien la geología de toda la zona, hay hechos que así parecen indicarlo. Entre otros, la naturaleza y disposición de las ignimbritas y los apuntamientos de pórfidos riolíticos o graníticos que les intruyen (lám. 2 C y D) —algunos de los cuales, con texturas de flujo y mineralizaciones de antimonio, p. e., las de Kolpa, tienen un carácter claramente subvolcánico—, y los rasgos estructurales que parecen observarse en las imágenes Landsat.

## Conclusiones

Como resumen de lo anteriormente expuesto, se pueden establecer las siguientes conclusiones: *a)* hasta ahora, todos los indicios de la formación Macusani que contienen minerales primarios de uranio se encuentran en los niveles más compactados de las rocas piroclásticas que constituyen la parte alta de la serie ignimbrítica; *b)* las rocas encajantes son, en todos los casos, tobas lapílicas, riolíticas y riocáciticas, vítreo-cristalinas, compuestas por cristales y fragmentos de cuarzo, feldespato, biotita y, menos frecuentemente, andalucita y moscovita, con abundantes litoclastos de cuarcitas y pelitas paleozoicas. La biotita, el cuarzo ahumado y la andalucita, idiomorfos y a veces de mayor tamaño que los otros componentes de la roca, especialmente los dos primeros, son especialmente abundantes en las tobas que contienen los indicios uraníferos; *c)* Salvo los indicios

de Chapi Bajo y Medio y Kijitian Bajo, las mineralizaciones uraníferas están formadas por pechblenda parcial o totalmente oxidada, y transformada por ello en gummitas y minerales hexavalentes, concretamente autunita, fosfuranilita, uranotilo alfa y, ocasionalmente, tobernita; *d*) La pechblenda y las gummitas forman vetas masivas que varían de un milímetro a 10 centímetros de potencia y rellenan fracturas paralelas, verticales o subhorizontales, abiertas como consecuencia de los procesos de compactación y contracción de las rocas volcánicas. De estas fracturas, las verticales son paralelas a las diaclasas de enfriamiento que dieron lugar a la disyunción columnar, mientras que las subhorizontales lo son a las fracturas conjugadas del sistema de cizalla que se desarrolló por la compactación, primero, y la distensión y asentamiento, después, de los materiales volcánicos; *e*) los minerales hexavalentes aparecen diseminados en estas mismas fracturas, o bien tapizan las diaclasas que, de forma irregular, atraviesan las rocas encajantes en las áreas mineralizadas.

En consecuencia, se puede afirmar que las mineralizaciones uraníferas de Macusani están controladas por tres factores geológicos:

- *Litológicos*: las anomalías uraníferas se encuentran siempre en las ignimbritas compactadas y diaclasadas que forman los niveles superiores de la serie volcánica.
- *Mineralógicos*: los indicios con minerales primarios de uranio se hallan siempre en tobas que se caracterizan por su abundancia en biotita, cuarzo ahumado y, en menor proporción, andalucita.
- *Tectónicos*: los minerales de uranio se depositaron en fracturas producidas como consecuencia de los procesos de compactación, contracción y asentamiento de los materiales volcánicos encajantes.

De acuerdo con ello, desde un punto de vista petrográfico, mineralógico y metalogénico, deberían tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones para llevar a cabo la exploración de este tipo de yacimientos:

- 1.º Intensificar la prospección en los niveles altos de la serie ignimbrítica, concretamente en las áreas que contengan abundante biotita y cuarzo ahumado, y posiblemente andalucita.
- 2.º Investigar los indicios uraníferos por medio de sondeos y labores mineras, pero teniendo en cuenta la forma, tamaño y distribución de la red de fracturas verticales y subhorizontales en las áreas con anomalías.
- 3.º Intensificar los estudios petrográficos y mineralógicos, tales como los microscópicos en luz transmitida y reflejada, y los análisis microquímicos, isotópicos y de inclusiones fluidas, que permitan establecer el origen de este singular tipo de yacimientos y puedan servir de ayuda para la exploración y, eventualmente, el tratamiento y la metalurgia, de estas mineralizaciones uraníferas.

## Bibliografía

- APARICIO, A.  
1981. Mineralización de uranio en rocas volcánicas terciarias de la Formación Los Frailes, Bolivia. IAEA-AG-162/26, 485-520.
- ARRIBAS, A. y FIGUEROA, E.  
1985. Geología y metalogénia de las mineralizaciones uraníferas de Macusani, Puno (Perú). En *Yac. Uran. Roc. Volc.*, IAEA-TC-490/14 (en prensa).
- AUDEBAUD, E.; LAUBACHER, G.; BARD, J.; CAPDEVILA, R.; DALMAYRAC, B.; MEGARD, F. y PAREDES, J.  
1973. La Cadena Hercínica en el Perú y Bolivia. *Est. Esp.*, 3, Min. Energ. Minas, Perú.
- BARNES, V. E.; EDWARDS, G.; McLAUGHLIN, W. A.; FRIEDMAN, I. y JOENSUU, O.  
1969. Macusanita occurrence, age, and composition, Macusani (Perú). *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 81, 1541-1548.
- BELLIDO, E. y MONTREUIL, L.  
1972. Aspectos generales de la metalogénia del Perú. *Geol. Econ.*, 1, Min. Energ. Minas, Perú.
- BELLIDO, E.  
1982. Sinopsis de la geología del Perú. INGEMMET, Bol. 22.
- CURRY, D. L.  
1981. Two concepts of uranium geology in the USA that may be useful in Latin American Uranium exploration. IAEA-AG-161/6, 89-104.
- FRANCIS, P.  
1983. Giant volcanic calderas. *Scient. Amer.*, 248, 6, 46.
- GOODELL, P. C. y WATERS, A. C., editors  
1981. Uranium in volcanic and volcanoclastic rocks. AAPG, *Studies in Geology*, 13.

Recibido el 5 de julio de 1985.  
Aceptado el 16 de diciembre de 1985.

## LAMINA 1

- A. Una vista del río Macusani, a la altura del puente Huyquiza, donde el valle está excavado en las tobas que forman el borde oriental de la serie ignimbrítica. En primer término, la morrena frontal que cerraba el valle glacial del Chilcuno Grande, y que aparece profundamente excavada en la confluencia de este río y el Macusani. Al fondo y a la izquierda, afloramientos del basamento, constituido en esta zona por rocas de los grupos Ambo y Mitu.
- B. Aspecto de una de las vetas con pechblenda en la trinchera 2 de Chilcuno VI. También aquí, como en los otros indicios de la mitad oriental de la cuenca de Macusani, los minerales de uranio se depositaron en las fracturas de cizalla subhorizontales que tan abundantes son en las rocas piroclásticas.
- C. En este corte, producido por el río Macusani en el nivel superior de las tobas riolíticas, que es el que contiene la mayor parte de los indicios con pechblenda, se observan claramente los dos sistemas de fractura que afectan a las rocas piroclásticas: uno, vertical, debido a la contracción originada por el enfriamiento de las ignimbritas, y otro, subhorizontal, que coincide generalmente con las fracturas conjugadas de un sistema de cizalla dúctil que se desarrolló como consecuencia de la sucesiva compactación y descompresión, y posterior asentamiento, de los diferentes materiales que constituyen la pila volcánica.
- D. La zona de Okakaja, en el área de Chapi, donde se observa la típica morfología producida por la erosión fluvio-glacial y la acción del viento sobre las tobas riolíticas superiores, bien consolidadas y con marcada disyunción subvertical, en las que se encuentran los espectaculares indicios uraníferos de Chapi Alto. Estos aparecen como vetas subverticales, paralelas, formadas por gummita masiva, a 4.600 metros de altura.
- E. (1/4 del tamaño natural). Es en Pinocho donde mejor se observa hasta ahora la transformación de la pechblenda en gummitas negras, naranjas y amarillas; siendo de destacar el aspecto tan parecido que tienen estos minerales con algunos de los que se encuentran en los granitos hercínicos europeos, tanto en Francia (Margnac) como en España (Trujillo) y Portugal (Palheiros de Tolosa).
- F. En los indicios de Chapi Alto, la mineralización uranífera está formada por vetas subverticales de pechblenda masiva, pseudomorfizada ahora por gummita amarilla, cuya potencia varía de un milímetro a siete centímetros. La extraordinaria ley y potencia de estas singulares vetas uraníferas admite una gran dilución para la explotación del nivel mineralizado, situado aquí unos 30 metros por debajo del techo de las ignimbritas.

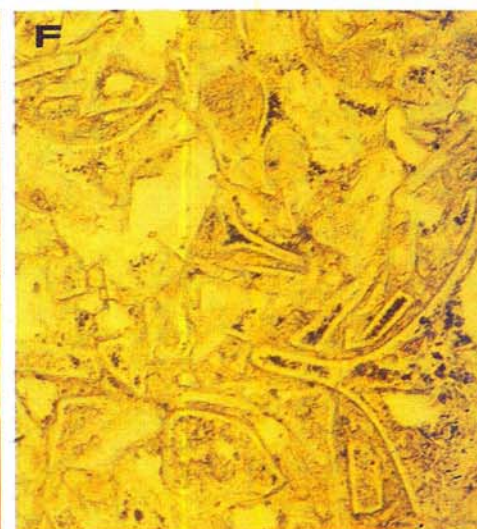






## LAMINA 2

- A. — Corta FE 1, banco 639. Los minerales primarios de uranio se encuentran únicamente en estructuras abiertas de las brechas, algunas de las cuales pueden llegar a tener varios decímetros de potencia.
- B. — Corta FE 3. Tal y como se observa en el hastial a la izquierda de la fotografía, la intensa, aunque limitada, cloritización de las pizarras encajantes de las brechas afectó a todos los minerales, excepto el rutilo.
- C. — Corta FE 3. Brecha de cuarzo filoniano hercínico rellena por carbonatos de dos venidas sucesivas: arriba, cristales de ankerita fibrorradiada depositados a más de 200°C; en el centro, sedimento formado por carbonatos rojos (hematites), grises (pirita) y blancos (calcita pura), depositados, a menos de 70°C y en condiciones casi superficiales, sobre la pechblenda (negro) que se ve en la parte inferior de la fotografía.
- D. — Corta FE 3, 1/3x. Los fragmentos de los sulfuros de Fe de la primera fase hidrotermal, frecuentemente brechificados y rodeados por la pechblenda y coffinita de la posterior venida uranífera, muestran una característica orientación como consecuencia del fuerte arrastre al que fueron sometidos por las soluciones mineralizadoras.
- E. — Corta FE 3, 1/2x. Durante las etapas finales del proceso mineralizador, los carbonatos, sulfuros de Fe y óxidos de U se depositaron como sedimentos finamente laminados.
- F. — Igual muestra que la de la figura anterior, sección transparente, 40 × LN. Al microscopio se observa muy bien la sedimentación graduada de los carbonatos y minerales metálicos.



### LAMINA 3

A. Luz transmitida, NC  $\times$  40, Chilcuno.

Las tobas cristalovítreas encajantes de la mineralización están formadas por abundantes cristales y fragmentos de cuarzo, sanidina, plagioclasas y biotita, rodeados por una matriz vítrea de composición cuarzo-feldespática.

B. Luz transmitida, NC  $\times$  40, Pinocho.

La biotita y andalucita, ésta de color rosa, pleocroísmo acusado y ocasionalmente zonada, son muy frecuentes y a veces abundantes en los niveles ignimbríticos que contienen los filoncillos de uranio. La andalucita aparece como cristales prismáticos, aciculares, que llegan a medir varios milímetros de longitud, o como fragmentos diseminados en la matriz. Aquí, entre nicoles cruzados, se observa el intenso proceso de desvitrificación que afecta a la matriz de las ignimbritas mineralizadas, y que ha dado lugar a la formación de abundante halloysita y montmorillonita en los huecos y fisuras de la roca.

C. Luz reflejada, LN  $\times$  300, Pinocho.

En este campo se observa muy bien la textura coloidal y las diferencias de poder reflector entre la pechblenda pura (gris oscuro) y la que contiene abundantes sulfuros de hierro (gris claro), así como el carácter, precoz o tardío, de la pirita (blanco) que aparece en el centro o rellenando los huecos de los esferulitos de uranio.

D. Luz reflejada, LN  $\times$  300, Pinocho.

Entre nicoles cruzados, se aprecian mejor las diferencias entre la pechblenda pura (negro) y la resultante de la cristalización de un gel complejo urano-sulfurado. A la izquierda, cristales tabulares de autunita más o menos limonitizados.

E. Tamaño natural. Aspecto de un fragmento de macusanita en las tobas encajantes de la mineralización de Chapi. Nótese la zona de alteración que rodea a la obsidiana, constituida por cuarzo criptocristalino y minerales de la arcilla.

F. Tamaño natural. En una sección de macusanita iluminada por transparencia se puede observar la fuerte orientación de los cristales aciculares de andalucita que se disponen en bandas en una matriz totalmente vítrea.



