A.GARCIA SANCHEZ
J.SAAVEDRA ALONSO
y la colaboración de
A.S. GRACIA PLAZA

2

SOBRE LOS RECURSOS MINERALES DE LA PROVINCIA DE SALAMANCA

METODOS DE INVESTIGACION

I.O.A.T.O.-EXCMA. DIPUTACION PROVINCIAL
SALAMANCA

Ref. 12.981 (parte 1)
CB: 448269
180107

A. GARCIA SANCHEZ, J. SAAVEDRA ALONSO
y la colaboración de A. S. GRACIA PLAZA

BIBLIOTECA CONSEJ. SALAMANCA

SOBRE LOS RECURSOS MINERALES DE LA PROVINCIA DE SALAMANCA. METODOS DE INVESTIGACION

TEMAS DE DIVULGACION

I.O.A.T.O.-CENTRO DE EDAFOLOGIA Y BIOLOGIA APLICADA
EXCMA. DIPUTACION PROVINCIAL

SALAMANCA
1980

INTRODUCCION

Desde un punto de vista económico, es sobradamente conocida la gran importancia que tiene el abastecimiento de minerales en el desarrollo de un determinado país. El crecimiento industrial obliga a una dependencia continua y creciente de las materias primas minerales, lo que implica la necesidad de establecer las reservas de que se dispone y, en consecuencia, esforzarse en la investigación de los recursos posibles, que razonablemente cabe esperar en base a unas determinadas características geológicas.

En la Provincia de Salamanca, aunque con un potencial en yacimientos bastante importante como indica su propia estructura geológica y amplio historial minero, el conocimiento de sus reservas minerales es muy deficiente; por ello resulta muy conveniente impulsar su investigación.

En esta publicación se pretende dar a conocer brevemente algunos aspectos en relación con lo expuesto anteriormente:

— Potencial minero de la Provincia.
— Tipos de yacimientos.
— Métodos de exploración y evaluación de yacimientos.
— Factores económicos y técnicos en la investigación minera.

Dadas las características metalogénicas complejas de la provincia, haremos especial referencia a los minerales que tradicionalmente se han venido explotando por su mayor abundancia o interés económico (casiterita, wolframita y scheelita, sobre todo). Igualmente pretendemos destacar la existencia de recursos que hasta el momento no han tenido la atención que debieran por su importancia económica. Entre éstos están determinados elementos químicos de escasa abundancia y que han cobrado en los últimos tiempos gran importancia industrial por su uso en tecnologías especiales y sofisticadas (Rubidio, Tántalo, Litio, Tierras Raras, etc.). En muchos casos, pueden ser subproductos en yacimientos de otros elementos más comunes. También se pueden incluir entre estos recursos muchas sustancias minerales no metáli-

cas, materiales de la construcción, cerámicos, etc., que han cobrado no menos importancia en la sociedad actual.

Las propias características geológicas de la Provincia son un factor condicionante de la situación minera actual. En concreto, la ausencia de grandes aluviones fácilmente explotables (o grandes yacimientos de tipo primario) junto con la existencia de yacimientos pequeños y dispersos (aunque relativamente abundantes) ha influido negativamente en su investigación y explotación, dado el poco interés que ofrecían a las grandes compañías mineras. Desde nuestro punto de vista, cualquier yacimiento, independientemente de su tamaño y cuyo suficiente conocimiento del mismo permita aventurar una explotación rentable, deber ser considerado pieza importante en vista a un autoabastecimiento de recursos naturales, especialmente de aquellos metales que es deficitario, o los de elevado precio, como estaño, wolframio, tántalo, etc.

POTENCIAL MINERO DE LA PROVINCIA

Cuando las técnicas de análisis químico permitieron determinar cantidades ínfimas, se comprobó que cualquier material geológico contenía prácticamente todos los elementos químicos que se presentan en la Corteza Terrestre, variando sólo en su proporción. Un yacimiento no es más que el resultado de la coincidencia de una serie de procesos geológicos que, actuando sobre determinados materiales en conjunto, contribuyen a la acumulación de ciertos elementos. En consecuencia, el conocimiento de los materiales que constituyen una región, así como los procesos que han tenido lugar, son base fundamental para la comprensión de su potencial minero.

En la figura 1 se indican los caracteres fundamentales de la provincia, en base al Mapa Geológico de España 1:200.000 (1971). A grandes rasgos, hay tres grupos de terrenos. Uno constituido por rocas antiguas, pizarras, esquistos, cuarcitas, calizas, etc. (Precámbrico y Paleozoico Inferior), que pueden tener entre cuatrocientos a seiscientos millones de años. Otro, también antiguo, el de las rocas graníticas, y, el tercero, mucho más moderno, formado por rocas generalmente menos consolidadas y compactas, areniscas, conglomerados, etc. (Terciario y Cuaternario). Muy aproximadamente, cada uno de estos grupos ocupa 1/3 de la superficie provincial.

La figura 2 contiene todos los indicios mineros citados en el Mapa Metalogénico de España 1:200.000 (1975); desde luego, existen algunos más y muchos de los que figuran tienen escaso interés económico; puede observarse cómo los terrenos más modernos son los más escasos en minas.

A continuación se analizarán someramente las posibilidades mineras en cada uno de estos grupos, sin entrar en caracterizaciones complicadas de sus yacimientos.

En los yacimientos de estos terrenos pueden presentarse masas de determinados minerales (scheelita, etc.) bajo la forma aproximada de estratos de estructura más o menos compleja. Con frecuencia, el nivel mineralizado visible en superficie suele continuar en profundidad en forma complicada, cuando los materiales están doblados o fracturados; hecho importante que requiere una investigación previa, puesto que la posible mina podría explotarse de diversas maneras, dependiendo de la forma de la estructura y de la profundidad alcanzada. Estos yacimientos pueden ser de varios tipos en cuanto a su origen:

1. *Placeres fósiles.* Los minerales en este caso han sido transportados por el agua desde una zona más o menos lejana. Por tanto aparecerán

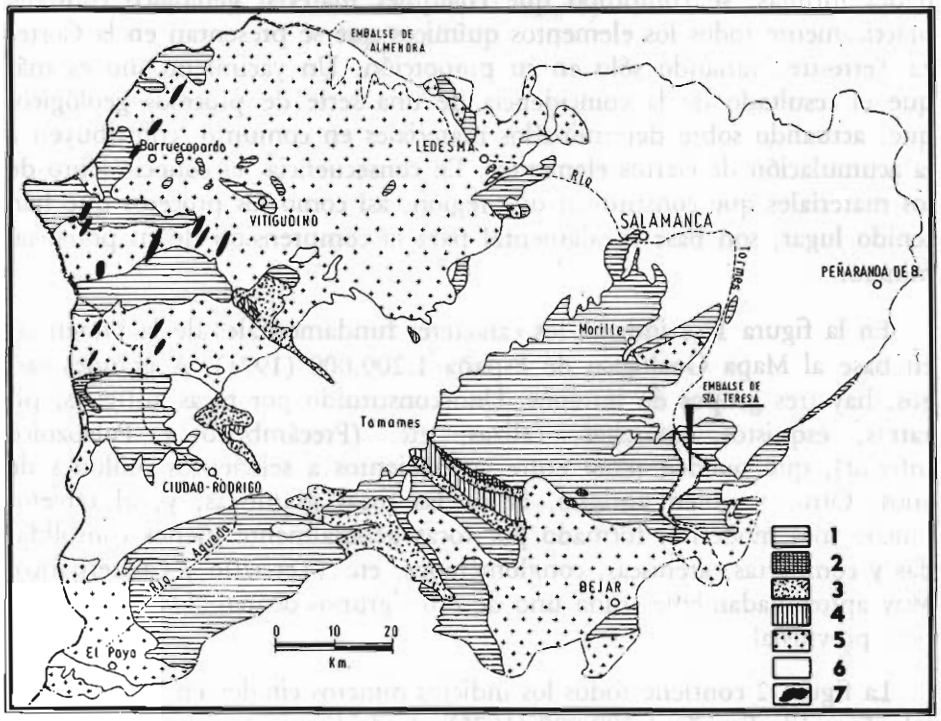

FIG. 1. *Esquema geológico de la provincia de Salamanca.*

1. *Esquistos, grauvacas, micacitas, cuarcitas, calizas, conglomerados, etc. (Precámbrico- Cámbrico).*
2. *Calizas (Cámbrico).*
3. *Cuarcitas (Ordovícico).*
4. *Pizarras ampelíticas, cuarcitas, metavulcanitas, cornubianitas, etc. (Silúrico).*
5. *Granitos y neises.*
6. *Areniscas, conglomerados, calizas, margas, arenas, gravas, etc. (Terciario y Cuaternario).*
7. *Diques de cuarzo.*

aquellos que hayan resistido ese transporte, y en función de la distancia recorrida, grado de resistencia mecánica y química, etc., presentarán distinto grado de desgaste y redondeamiento. Suelen ser de distribución irregular, en cuanto a contenidos de la mena.

2. *Sedimentarios masivos.* Originados en determinados ambientes geológicos durante la sedimentación. Las aguas marinas, en circunstancias especiales, pueden llevar disueltos determinados elementos metálicos. Si estas aguas llegan a lugares de condiciones fisicoquímicas diferentes, es posible que dichos elementos precipiten como minerales útiles. Por ejemplo, el Hierro puede acumularse en las costas, teniendo este origen los depósitos de óxidos de hierro asociados a algunas rocas típicas de antiguos litorales (cuarcitas); de forma semejante ocurre con otros elementos, como el Cobre, Manganeso, etc.

También en otros ambientes marinos, la muerte de organismos y deposición de sus restos ha dado lugar a que se forme carbono puro, constituyendo

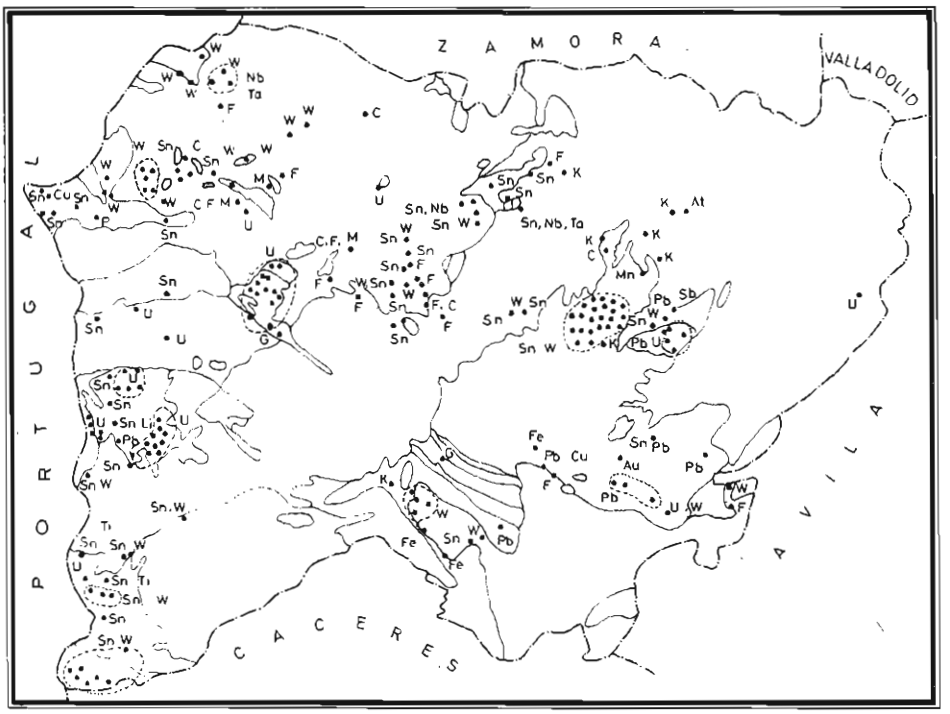

FIG. 2. *Indicios mineros de la provincia de Salamanca. At: Atapulgita; Au: Oro; C: Cuarzo; Cu: Cobre; F: Feldespatos; Fe: Hierro; G: Grafito; K: Caolín; Li: Litio; M: Mica; Mn: Manganeso; Nb: Niobio; P: Fósforo; Pb: Plomo; Sb: Antimonio, Sn: Estaño; Ta: Tántalo; Ti: Titanio; U: Uranio; W: Wolframio.*

parte de las pizarras negras (a veces ricas también en sulfuros) y originando posteriormente por metamorfismo concentraciones de Grafito. Los yacimientos de este origen suelen ser extensos, aunque de bajos contenidos.

3. *Vulcano - Sedimentarios.* En este caso son producto de la actividad volcánica en conjunción con la precipitación de los elementos de interés de los fluidos volcánicos al reaccionar con rocas carbonatadas o no de su entorno.

ROCAS GRANÍTICAS

Ya a primera vista, se aprecia que el máximo número de indicios minerales de Salamanca está en, o próximo a, granitos.

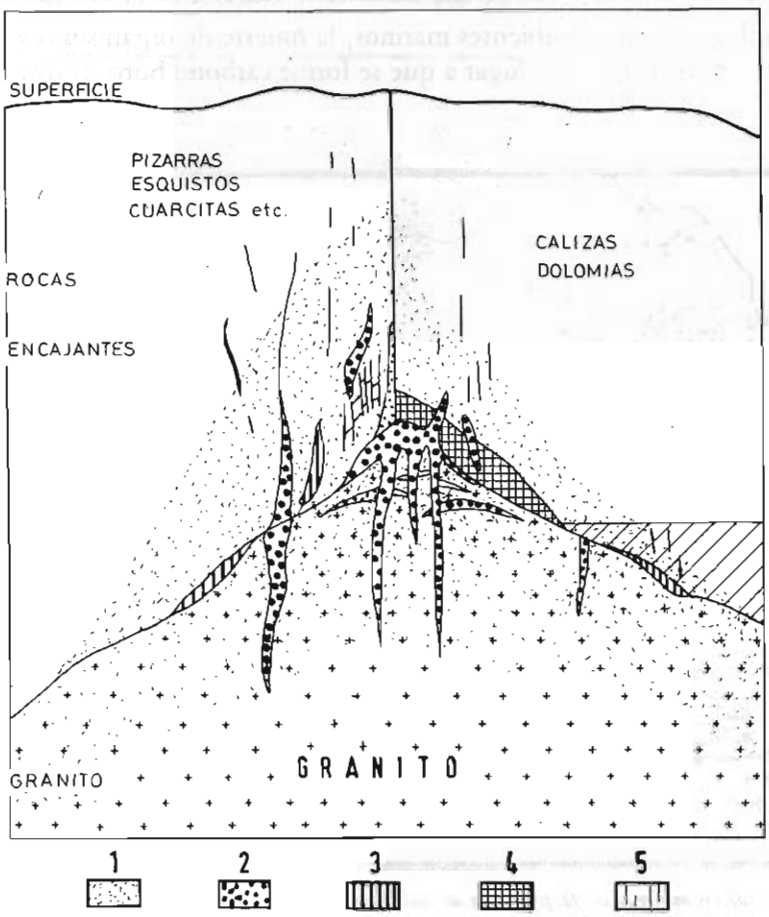

FIG. 3. *Corte esquemático de una cúpula granítica y sus mineralizaciones asociadas. 1. rocas greisenizadas; 2. greisen; 3. pegmatitas; 4. Skarns; 5. filones de cuarzo y Stockworks.*

En último término, la razón de ello es la misma que se dijo para las minas debidas a procesos volcánicos. Durante su formación, el granito está inicialmente fundido en parte y puede contener disueltos (hasta más del 10 % de su peso) fluidos ricos en elementos metálicos. En determinadas circunstancias y al solidificar el granito, estos fluidos se desprenden y rellenan los huecos disponibles (grietas, etc.), constituyendo filones y masas mineralizadas. Así aparecen concentraciones de Estaño, Wolframio, Niobio, Tántalo, Uranio, Fósforo, Litio y otros. Estos yacimientos pueden ser de diversos tipos:

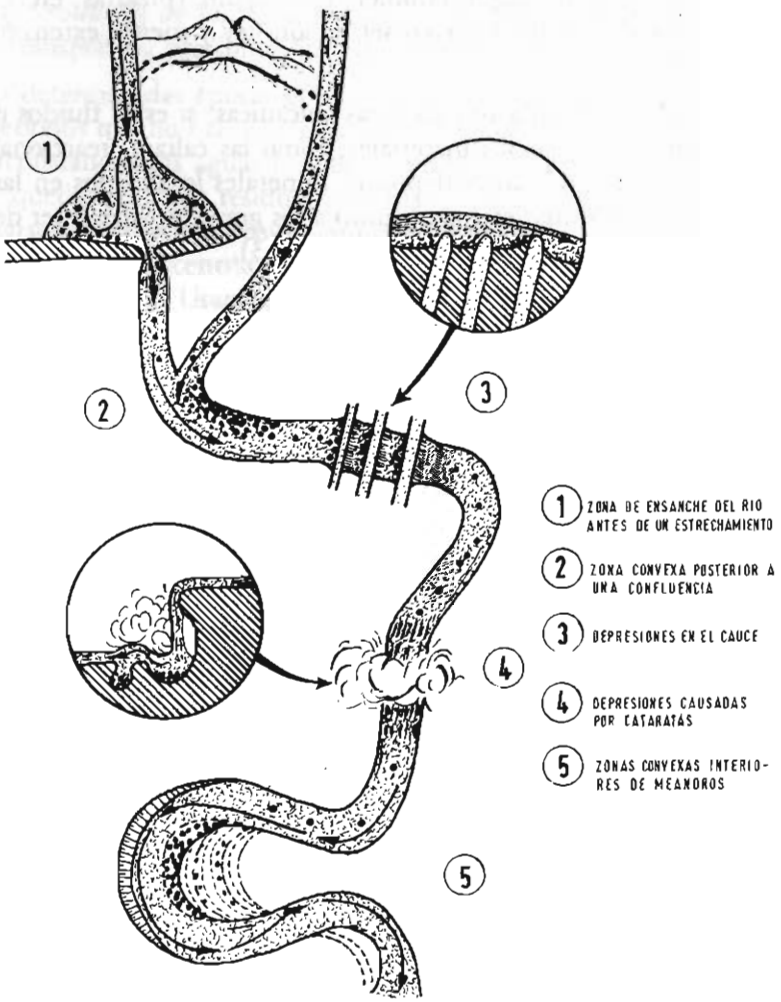

FIG. 4. *Zonas de acumulación de minerales pesados en el curso de un río.*

1. Granitos que contienen minerales útiles dispersos. En este caso, los fluidos se han esparcido por la roca, transformandola en mica, cuarzo y arcillas, quedando a veces un poco de feldespato. Son yacimientos bastante extensos y de baja ley. Se empobrecen en profundidad, y a veces aparece también este tipo de mineralización en la roca encajante.

2. Granitos «normales» atravesados por venas, diques, masas o filones mineralizados. Al cristalizar el granito los fluidos ocuparon los huecos libres producidos por roturas diversas.

3. Una variante del caso anterior se produce cuando las fuerzas que causan estos huecos se propagan también al encajante (pizarras, etc.). Estos yacimientos y los del grupo 2 suelen ser de alta ley y menor extensión que los del grupo 1.

4. Al igual que ocurría con las rocas volcánicas, si estos fluidos entran en contacto con determinados materiales, como las calizas, reaccionan con ellos y se producen importantes depósitos minerales localizados en las mismas. En este caso las minas aparecen junto a los granitos, suelen ser de poca extensión y de leyes altas y muy variables (fig. 3).

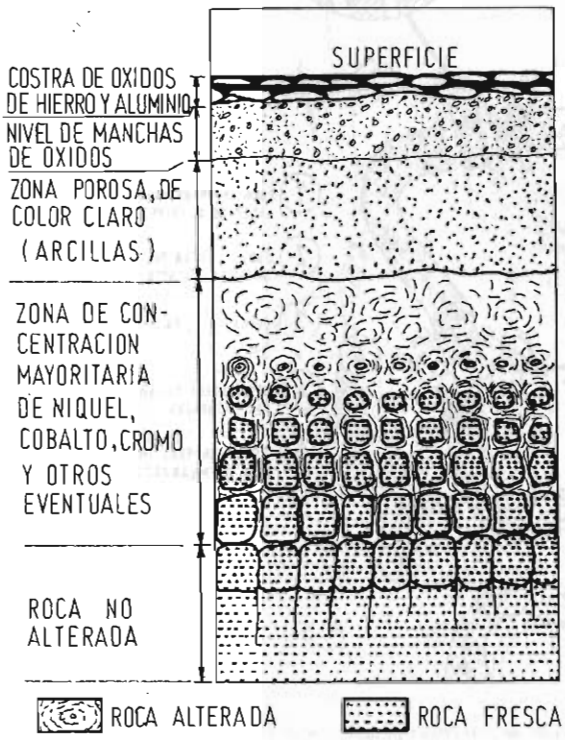

FIG. 5. *Esquema de una formación de mineralizaciones «secundarias» producto de la alteración de las rocas.*

TERRENOS DEL TERCER GRUPO (TERCIARIO Y CUATERNARIO)

Estos materiales se formaron a partir de los citados hasta ahora por alteración de las rocas existentes («meteorización»), transporte y sedimentación en ambiente continental. Dos tipos de mineralizaciones pueden esperarse:

1. *Aluviones.* La destrucción por meteorización de granitos y otras rocas del Precámbrico y Paleozoico; el transporte por las aguas de estos materiales permite, si contienen minerales de interés económico, que éstos puedan acumularse en algún tramo favorable de los cursos fluviales, tal como se expresa en la fig. 4.

2. *Productos de la alteración diferencial* de los minerales de las rocas y de su transporte y precipitación selectiva.

En determinadas épocas geológicas el clima fue muy distinto al actual, con períodos mucho más cálidos y húmedos, incluso de tipo tropical. En estas circunstancias las aguas han llegado a disolver algunos minerales de las rocas, quedando como residuo otros más insolubles. De esta forma pueden originarse acumulaciones importantes de algùnos minerales. Como indica la fig. 5, pueden concentrarse óxidos de hierro y aluminio, arcillas (Caolín, etc.) y minerales de Uranio, Níquel, etc., en determinados niveles. Estos yacimientos suelen ser extensos y de baja ley.

TIPOS DE YACIMIENTOS

Como es fácil suponer, existe gran variedad de clasificaciones para los yacimientos minerales de interés económico; dado el carácter orientativo de esta publicación, las que a continuación se exponen pretenden solamente un enfoque eminentemente práctico, y adaptado a las carateíasticas particulares de la provincia de Salamanca.

Atendiendo al *tamaño de los yacimientos* y a los *tipos de recursos explotables* éstos pueden esquematizarse como sigue:

YACIMIENTOS DE GRAN TAMAÑO EN FORMA DE CAPA

1.	Aluviones y coluviones	Oro, casiterita, wolframita, rutilo, ilmenita, monacita, circón, columbo-tantalita.
2.	Rocas poco compactas (generalmente modernas)	Minerales de manganeso y hierro, arcillas, magnesita, caolín, materiales de construcción.
3.	Rocas compactas (generalmente antiguas) ..	Esquistos carbonosos, minerales de hierro y titanio, fosforitas, minerales de uranio, magnesita, sulfuros, fluorita, barita, materiales de construcción.

YACIMIENTOS DE GRAN TAMAÑO DE FORMA IRREGULAR

1.	Intrusiones de composición distinta al entorno	Minerales de titanio, molibdeno, estaño, wolframio, oro, sienitas.
2.	Skarns y Greisens	Minerales de hierro, cobre, plomo, cinc, wolframio, molibdeno, estaño, litio, berilio, amiantos, grafito, talco.

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS · BIBLIOTECA · SALAMANCA

YACIMIENTOS DE TAMAÑO MEDIO

FILONIANOS

1.	Rocas intrusivas (graníticas) y volcánicas ...	Sulfuros, barita, grafito, fluorita, corindón, amiantos.
2.	Rocas sedimentarias	Minerales de estaño, wolframio, molibdeno, oro, plomo, cinc, y pequeñas proporciones de plata, cadmio, bismuto, antimonio, indio, germanio, galio, etc.
3.	Contactos de granitos	Minerales de berilio, litio, tántalo, cerio, oro, micas.

YACIMIENTOS DE PEQUEÑO TAMAÑO

FILONIANOS

1.	Rocas sedimentarias y metamórficas.....	Minerales de cobre, oro, wolframio.
2.	Rocas carbonatadas (Skarns)	Minerales de estaño, plomo, cinc, y pequeñas proporciones de plata.

YACIMIENTOS DE PEQUEÑO TAMAÑO

Y FORMAS IRREGULARES

1.	Zonas de contactos.....	Minerales de berilio, tántalo, cerio, wolframio, estaño, corindón, cuarzo piezoeléctrico, espato de Islandia, fluorita óptica, esmeril.

Por otra parte, y atendiendo a los factores geológicos estructurales que controlan las mineralizaciones, podemos dividir las «zonas mineras» en:

I. ESTRUCTURAS PLEGADAS

(ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS)

1.	Estratos favorables	Yacimientos estratiformes.
2.	Flancos de los pliegues	Filones interestratificados, brechas estratiformes.
3.	Charnelas de los pliegues	Filones en forma de silla.
4.	Zonas de trituración por plegamiento	Yacimientos estratiformes y en forma de columnas.
5.	Zonas de esquistosidad desarrollada.....	Mineralizaciones complejas y en capas.

II. ESTRUCTURAS CON FALLAS

1.	Grandes fallas	Yacimientos filonianos y en masas.
2.	Fallas medianas	Filones de distribución compleja.
3.	Pequeñas fallas	Filones ramificados, zonas de trituración mineralizadas.

III. ESTRUCTURAS CON GRIETAS

1.	Diaclasas	Filones sencillos.
2.	Cizallas	Filones complejos y acompañados con frecuencias por masas alargadas.
3.	En relación con intrusiones	Filones ramificados.
4.	Zonas con gran desarrollo de microfisuras	Stockworks, filones reticulares y yacimientos en masa.

IV. CONTACTOS LITOLOGICOS

1.	Rocas intrusivas-calizas (Skarns)	Yacimientos estratiformes y en lentejones.
2.	Cambios litológicos	Filones, capas pequeñas y formas muy irregulares.

No obstante la variabilidad de los yacimientos minerales (que hacen de cada explotación un caso especial que debe ser estudiado particularmente), se pueden dar aproximaciones acerca de los factores más importantes que definirán las posibilidades de explotación en función de sus leyes y las reservas presentes.

Como ejemplo, se exponen a continuación dos conjuntos de datos orientativos especialmente interesantes para esta provincia.

YACIMIENTOS DE WOLFRAMIO

Tipo	Leyes de WO_3 en % (comunes)	Porcentaje de la producción mundial
a) Capas y Skarns Scheelitíferos	0,3 - 0,6 %	55
b) Filones de cuarzo con wolframita y zonas filonianas	0,6 - 4,0 %	25
c) Placeres de wolframita (aluviones y coluviones)	Capas delgadas mínimo 0,03 % Capas gruesas mínimo 0,015 %	20

YACIMIENTOS DE ESTAÑO

Tipo	Ley % Sn	Porcentaje de la producción mundial
a) Placeres de casiterita (aluviones y coluviones)	Capas gruesas mínimo 0,015 % Capas finas mínimo 0,03 %	70
b) Filones medios y masas, greisens y contactos	Filones 1 a 4 % Masas 0,2 a 1,0 %	10
c) Filones pequeños y zonas filonianas	1 a 5 %	20

GREISEN: roca granítica rica en flúor compuesta fundamentalmente de cuarzo, mica (moscovita) y topacio; con turmalina, fluorita, rutilo, casiterita y wolframita, como minerales accesorios más comunes.

PEGMATITA: roca ígnea de grano grueso, generalmente en forma de diques y asociadas a rocas plutónicas (granitos, etc.). A veces están mineralizadas con Litio, Flúor, Niobio, Tántalo, Uranio, Estaño, etc.

SKARN: roca compuesta casi exclusivamente de minerales calcosilicatados, originados a partir de rocas carbonatadas (calizas y dolomías) en las que se han introducido cantidades variables de Silicio, Aluminio, Hierro, Magnesio, etc.

STOCKWORK: masa de roca interpenetrada por gran número de filoncillos mineralizados y que generalmente puede ser explotada en conjunto (al «todo uno»).

METODOS DE EXPLORACION

En este apartado nos ocuparemos de los *métodos de estudio* utilizados en la *localización de nuevos yacimientos*. Generalmente se llevan a cabo en zonas relativamente amplias, donde no se conoce la existencia de explotaciones antiguas ni de indicios mineros citados. En principio, se deben descartar sólo aquellas zonas que, desde un punto de vista geológico a escala regional (litología, estratigrafía, etc.), no ofrecen ninguna posibilidad.

Lógicamente este tipo de investigaciones, por sus características y riesgos en muchos casos, deben recaer en cuanto a iniciativa y soporte económico en organismos oficiales y similares.

El método a seguir sería, de forma muy esquemática:

— Un *previo reconocimiento geológico-minero* del área seleccionada y realización de un esquema cartográfico fundamentalmente de índole minero a escalas de mayor detalle que las habituales en otros estudios geológicos (1:10.000, por ejemplo).

— *Prospección geoquímica estratégica;* consiste en una prospección a gran escala, cuyo objetivo es descubrir la existencia de una *aureola de dispersión* del metal o metales que se buscan. Dicha aureola de dispersión se traduce en una anomalía geoquímica positiva del elemento en cuestión; es decir en un contenido superior al normal (fondo geoquímico regional o local) de la zona estudiada. Por ejemplo, si en una zona granítica el contenido normal en estaño es de 5 gramos/Tonelada (fondo geoquímico regional), una anomalía positiva del estaño en dicha región la formarían valores de contenidos en ese elemento claramente superiores a 5 (por ejemplo, 50-200 gramos/Tonelada). La *aureola de dispersión* sería aquella zona con contenidos en estaño anómalos.

Se distinguen dos tipos de *aureolas de dispersión*. Una llamada primaria, originada durante la formación de un yacimiento en los procesos que han tenido lugar en el interior de la corteza terrestre, y otra denominada se-

cundaria, formada durante la meteorización del yacimiento en la superficie de la tierra. Naturalmente una aureola de dispersión primaria es muy raro encontrarla en superficie (aflorando). Generalmente se localizan mediante redes de sondeos o mediante prospección geoquímica de elementos indicadores, por ejemplo Arsénico para Oro, Plata, Cinc y Cobre; Selenio y Molibdeno para Uranio, etc.

De esta forma, el fin de la prospección geoquímica es la localización de aureolas de dispersión secundaria, mediante el análisis químico (para el elemento o elementos de interés) de materiales de la superficie terrestre, que pueden ser en cada caso, en muestras de:

— rocas
— suelos, sedimentos
— aguas (red hidrográfica)
— plantas.

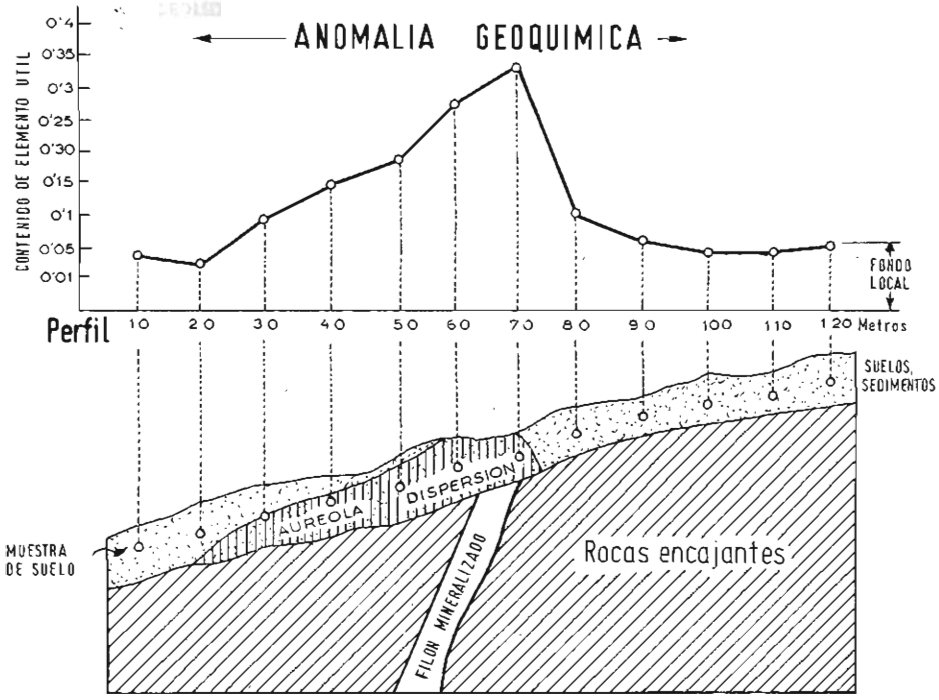

FIG. 6. *Representación esquemática de una prospección en suelos.*

Un esquema representativo de una prospección en suelos para la localización de un filón mineralizado sería, el sugerido en la fig. 6.

Dentro de las aureolas de dispersión secundaria es preciso hacer distinción de dos tipos principales según su mecanismo de formación:

— Dispersiones químicas
— Dispersiones mecánicas.

En el primer caso la dispersión del elemento o elementos de interés se hace por disolución química o en forma coloidal, por las aguas de drenaje; mientras que en el segundo, se realiza por gravedad, mediante el arrastre por las aguas superficiales y sin alterar la forma química del mineral; éste es el caso de los aluviones, deluviones y coluviones.

En función de que se trate de un tipo u otro, es preciso aplicar distintos métodos para su localización; así, generalmente ha de aplicarse la prospección geoquímica (en cualquiera de sus variantes) para las dispersiones de tipo químico, y la prospección a la batea (métodos de lavado) para las dispersiones mecánicas. Naturalmente esto depende de la resistencia a la meteorización del mineral primario; por ejemplo para los de Cobre, Plomo, Cinc, Uranio, inestables y móviles, es útil la propección geoquímica; para los de Estaño, Tántalo, Wolframio, Circonio, Titanio, resistentes al ataque químico, la prospección a la batea.

A continuación, haremos mención breve de algunas características de los diversos métodos usados en la prospección geoquímica estratégica.

Muestreo de sedimentos en la red hidrográfica

Es recomendable utilizarlo previamente a cualquier otro método de investigación. La escala de trabajo debe ser grande relativamente (1:50.000, incluso 1:200.000). El muestreo ha de realizarse preferentemente en la misma corriente de agua, es decir, en los sedimentos del lecho actual a lo largo de las orillas sumergibles. La densidad de la toma de muestras (variable con la escala de trabajo) ha de ser, aproximadamente:

para escala 1:50.000; muestras cada 200 metros; 10 muestras/km.^{2};
para escala 1:200.000; muestras cada 800 metros; 2 muestras/km.^{2}.

Entre las ventajas de este método se pueden citar: La posibilidad de utilizar lechos de cursos de agua secos (que no son utilizables en los métodos de lavado e hidrogeoquímico), determinar simultáneamente las dispersiones químicas y mecánicas (y éstas en su estadio de diseminación

más fina). Da buenos resultados para casi todos los metales y sobre todo en aquellas regiones con red hidrográfica en estado activo (relieve accidentado).

Muestreo según una red geométrica

Se realiza mediante la toma sistemática de muestra (suelos o rocas) según ciertas direcciones (perfiles) a distancias determinadas, formado así los puntos de muestreo una red geométrica generalmente rectangular, más raramente cuadrada, y que permiten levantar mapas metalométricos con el fin de delimitar aproximadamente las zonas mineras con aureolas de dispersión. Las escalas de trabajo suelen ser más reducidas que en el caso anterior, así como los espaciados entre muestras, por ejemplo:

escala 1:25.000; 250 metros entre perfiles; muestras cada 40 metros;
escala 1:10.000; 100 metros entre perfiles; muestras cada 20 metros.

La elección de la escala idónea dependerá fundamentalmente de los resultados del estudio geológico-minero previo y de los fines de la investigación. Es conveniente que los perfiles se orienten perpendicularmente a la dirección principal de las estructuras geológicas, o transversalmente al alargamiento supuesto de la aureola de dispersión (perpendicularmente a la dirección de la pendiente, etc.). Cuando el estudio se hace sobre muestras de suelos han de determinarse previamente algunas de sus características debido a las pérdidas y ganancias relativas de los distintos elementos, según sea el proceso de su formación. En realidad son muchos los factores que intervienen en esto y la complejidad del problema es grande. Pero al menos puede determinarse algún índice de meteorización potencial en el tipo de suelo dominante en la región, relativo a las rocas subyacentes, que junto con otros parámetros pueden corregir los efectos enmascarantes propios de la formación del suelo (acumulación o lixiviación). También es conveniente, en cada caso, determinar el horizonte del suelo de mayor acumulación, que es función primordialmente del tipo de materia orgánica y de la mineralogía de sus arcillas.

Método hidrogeoquímico

Se basa en el análisis químico de las aguas: fuentes, pozos, ríos, arroyos, etc.; aplicable específicamente en regiones de clima húmedo, con red

hidrográfica bien desarrollada y posibilidades de muestreo de aguas subterráneas. Este método se ha mostrado útil para detectar yacimientos de Cinc, Cobre, Uranio, Molibdeno, e incluso de Níquel, Cobalto, Vanadio, Cromo, etc. (elementos móviles en las condiciones de hipergénesis). También puede servir para elementos inmóviles mediante el análisis en las aguas de indicadores indirectos; tal es el caso, bastante atrayente, del Estaño, cuyos yacimientos pueden localizarse en muchos casos (estrictamente, sus aureolas de dispersión) mediante el análisis químico del Flúor en las aguas de drenaje de forma rápida, sencilla y muy barata.

Un esquema representativo de este método se presenta en la fig. 7.

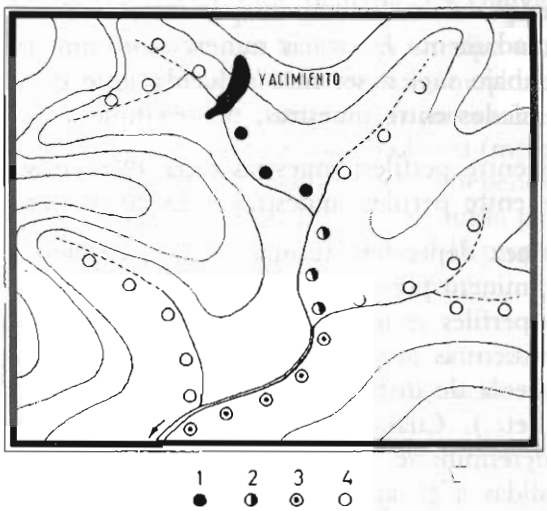

FIG. 7. *Esquema de una prospección hidrogeoquímica. Los círculos representan los puntos de muestreo. 1: alta concentración del elemento de interés; 2: concentración media; 3: concentración baja; 4: trazas.*

MÉTODO BIOGEOQUÍMICO

Se fundamenta en el análisis químico de las plantas y en la correlación observada entre su composición en elementos metálicos y los contenidos en los suelos sobre los que se desarrollan. Es decir, que una anomalía geoquímica en el suelo puede también reflejarse en la vegetación, con valores anómalos en su composición. Se ha usado este método con éxito en la prospección de muchos elementos: Cobre, Cinc, Manganeso, Níquel, Cobalto, etc.

El grado de concentración en las cenizas de algunas plantas de zonas mineralizadas, varía con el elemento en cuestión fundamentalmente, oscila entre 10 y 100 veces sobre aquellas que crecen sobre zonas estériles, pudiendo alcanzar hasta acumulaciones en torno a 1.000 veces (caso del Manganeso en determinadas especies vegetales).

Este tipo de prospección tiene algunas ventajas sobre las que utilizan muestras de suelos; entre otras, el poder determinar aureolas de dispersión en mayor profundidad, e incluso, posibilidad de localizar yacimientos no aflorantes. La profundidad máxima que se alcanza con este método (función de diversos factores, geológicos, botánicos y edáficos) se estima del orden máximo de 20 a 30 metros.

Lógicamente es recomendable aplicar este método en regiones con gran desarrollo de depósitos aluviales, eólicos, marinos, etc.

Es conveniente determinar previamente a la aplicación de estos métodos, la especie de planta idónea, su parte de mayor acumulación de elementos (hojas, tallos, etc.) y la mejor época del año para el muestreo.

El método geobotánico consiste en analizar el tipo y características de la vegetación en una determinada región, ya que algunas especies (indicadoras) se adaptan en suelos con anomalías geoquímicas en determinados elementos que pueden ser consecuencia de un yacimiento subyacente de interés económico; o bien porque algunos cambios morfológicos en las plantas de la región son debidos a dicha anomalía geoquímica.

El método de lavado (prospección a la batea)

Su fin es localizar un mineral de interés económico contenido en los concentrados de lavado, una vez separadas las arcillas, arenas y gravas, de menor densidad. Esta operación se realiza en muestras de aluviones, deluviones, suelos o incluso rocas trituradas o parcialmente descompuestas por la erosión. El muestreo se hace generalmente siguiendo la red hidrográfica hasta determinar el lugar de donde proviene el mineral útil en cuestión, o sea el yacimiento primario.

Este método puede utilizarse en la investigación de un grupo de minerales de densidad elevada relativamente a los minerales silicatados más comunes, y de gran resistencia mecánica y química a su desintegración. Este es el caso entre otros de: Casiterita, Wolframita, Columbo-Tantalita, Ilmenita, Rutilo, Monacita, Oro y en menor grado, Scheelita.

Es recomendable hacer la toma de muestras después de las épocas de lluvia y crecidas intensas. En algún caso es conveniente durante el muestreo llegar sólo hasta un preconcentrado de minerales pesados, y efectuar la concentración definitiva en el laboratorio con ayudas de otras técnicas (líquidos densos, separadora magnética, etc.).

Tiene su importancia práctica considerar el *tamaño, forma y color de los cristales,* así como la asociación de minerales presentes en los concentrados, pues son índice de las condiciones genéticas, tanto del yacimiento primario como del aluvión. Por ejemplo, la columbo-tantalita, más frágil que la casiterita, forma aureolas mecánicas de dispersión más pequeñas que las de ésta; la wolframita se rompe fácilmente y se redondea con dificultad por lo que las distancias que alcanzan sus aluviones respecto al yacimiento primario son escasas (a 6-8 km. desaparecen incluso los indicios). Por el contrario, la casiterita puede alcanzar distancias de hasta 15 km.

Finalmente, es recomendable una vez realizada la prospección hacer levantamientos de mapas de concentrados, marcando isolíneas de concentraciones para delimitar la aureola de dispersión secundaria, fig. 8.

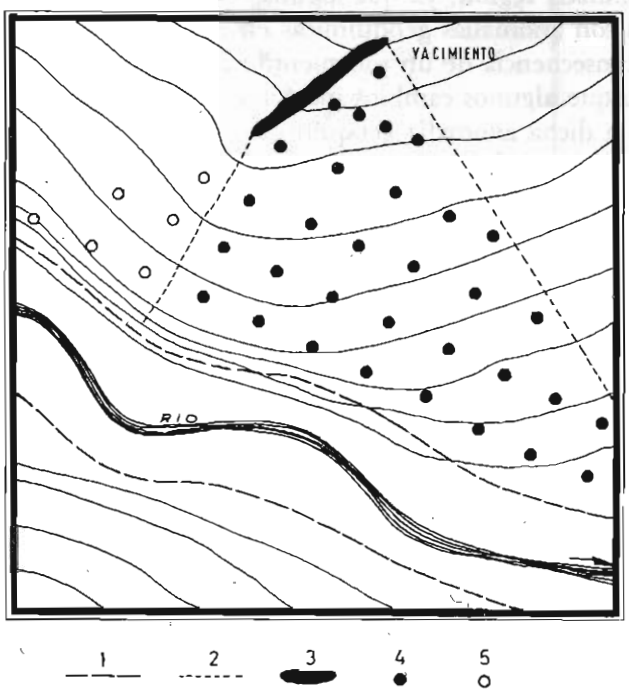

FIG. 8. *Esquema de prospección de placeres coluviales y de su yacimiento primario. 1: límite entre aluvión y deluvión; 2: límites de los placeres coluviales; 3: yacimiento primario; 4: muestras de batea con mineral útil; 5: idem sin mineral útil.*

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

La aplicación de algunas técnicas geofísicas resulta muy útil y necesaria en la prospección de yacimientos, y su importancia y desarrollo aumentan constantemente. Hay muchas cuestiones geológico-mineras que pueden resolverse por métodos geofísicos pero en general su utilización se dirige a:

— apoyo al *levantamiento geológico* a gran escala;

— detectar las *zonas mineras,* la mineralización en sí, sobre todo en aquellos casos de yacimientos no aflorantes que no dan aureolas de dispersión secundarias.

— La estimación de las *reservas,* mediante estudios de delimitación de las metalizaciones, su morfología, etc.

— Determinar las *características técnicas del yacimiento* para su futura explotación, estudios del encajante, condiciones hidrogeológicas, espesor del techo, etc.

Estos métodos se basan en la detección de anomalías geofísicas que se manifiestan siempre que alguna propiedad física del mineral útil buscado difiera notablemente de la de las rocas del entorno (10 a 25 % de diferencia, al menos). Su eficacia depende también mucho de la profundidad y dimensiones de la metalización. El caso en el que la longitud de ésta es superior a 1/3 de su profundidad, se considera favorable para dar una anomalía suficientemente intensa.

El *método geofísico* que se debe aplicar en cada caso depende fundamentalmente del tipo de yacimiento a prospectar y su entorno geológico, por ejemplo:

— Las *bolsadas grandes y medianas,* que se hallan entre diversos tipos de rocas, pueden estudiarse con ayuda de la prospección eléctrica, la magnetometría y la gravimetría.

— Los *filones malos conductores de la electricidad* (por ejemplo de cuarzo, pegmatitas) se detectan con ayuda del método de calicateo eléctrico y el método de relación de potenciales.

— Los *filones buenos conductores* (por ejemplo con gran contenido en sulfuros) son fácilmente detectados por el calicateo combinado.

— Los *filones ricos en minerales magnéticos* (magnetita, pirrotina, etc.) se localizan con la prospección magnética de detalle.

— Para las *capas de débil pendiente o pendiente nula* (en una serie sedimentaria) se utilizan los sondeos eléctricos verticales y la prospección sísmica.

— Los *filones y capas ricos en minerales radiactivos* se detectan (siempre que el recubrimiento no sea muy potente), mediante la investigación radiactiva.

— Los *placeres ocultos,* su espesor y relieve, se detectan mediante sondeos eléctricos verticales, y se delimitan por magnetometría, cuando la magnetita es parte importante de la fracción de minerales pesados.

Una vez localizada una *zona con mineralización,* se llega según el principio básico de la prospección, de aproximaciones sucesivas, a la *fase de prospección de detalle* con el fin de determinar los contornos de cada metalización, evaluar las reservas de mineral útil y considerar también todas las posibilidades de variaciones espaciales debidas a plegamientos y fracturas. En esta fase, la cantidad y tipos de ensayos se hace mayor que en la de exploración lógicamente, y no ha de limitarse a análisis químicos, sino que deben incluirse, análisis mineralógicos, ensayos técnicos del mineral útil, análisis granulométricos, ensayos en la ganga y encajantes, etc.

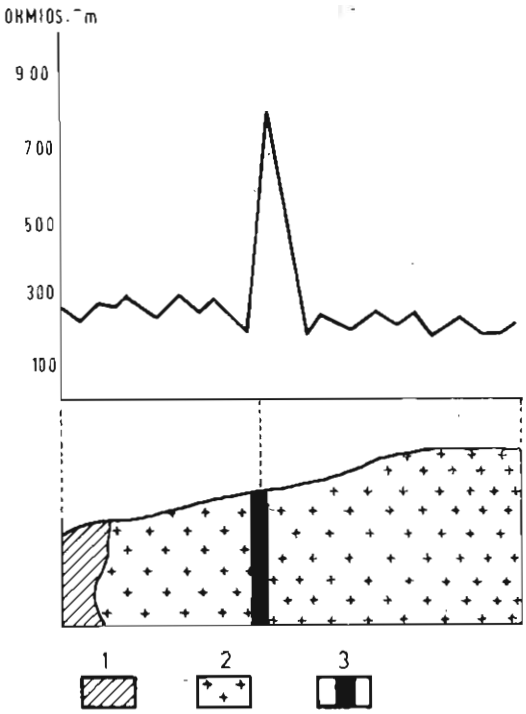

FIG. 9. *Curva de calicateo eléctrico sobre un filón de sulfuros.*

1. *esquistos;*
2. *granitos;*
3. *filón metalífero.*

Los datos de esta prospección se llevan a un mapa de menor escala, entre 1:2000 a 1:500, según las dimensiones y complejidad del yacimiento, como base del proyecto técnico de explotación del mismo.

En esta fase de investigación los métodos de trabajo pueden dividirse en tres grupos:

— labores mineras de investigación
— sondeos
— trabajos geofísicos.

El primer grupo que comprende, calicatas, pozos, desmontes de tierras, galerías, etc., ofrece los resultados más seguros por el acceso más eficaz al mineral útil. Los trabajos geofísicos proporcionan generalmente información bastante aproximada sobre dimensiones y disposición del yacimiento, y las perforaciones suministran resultados intermedios en este sentido. No obstante, hay que tener en cuenta que las labores mineras son un medio de prospección costoso y lento, y por el contrario las medidas geofísicas son menos costosas y su ejecución es mucho más rápida.

Los muestreos en superficie en esta fase de investigación se hacen en función del tipo de yacimiento. En aquellos que no tienen ni dirección ni buzamiento (inclinación) acusados (capas horizontales, metalizaciones isométricas) se utiliza la malla de prospección (cuadrada, rectangular, rómbica) de forma semejante como se vio en los métodos de exploración, pero con una densidad de puntos de muestreo mucho mayor, del orden de 10-15 metros de distancia entre puntos. Para los demás tipos de metalizaciones las labores y puntos de muestreo se disponen según líneas de investigación orientadas transversalmente a la dirección y buzamiento.

ASPECTOS ECONOMICOS Y TECNICOS EN LA INVESTIGACION MINERA

La inversión en la exploración minera cuando se realiza de una forma racional, con suficientes medios técnicos, sin agobios y exigencias de rápidos resultados, es muy rentable y debe hacerse de acuerdo a las demandas previsibles de materias primas. En este sentido, es lógico un inmediato relanzamiento de esta actividad como consecuencia de una subida general de las cotizaciones de dichas materias primas minerales, de la necesidad de aprovechamiento de los recursos propios dentro de un contexto de reactivación económica general. Es de destacar la iniciativa por parte de la Administración del Estado, tomada en consonancia con estos hechos, de elaborar el Plan Nacional de Abastecimiento de Materias Primas Minerales. En él se contempla también, y se apoya, el papel de la iniciativa privada en el campo de la investigación mineral con importante participación en su financiación para el período 1979-82.

Desde un punto de vista económico al plantearse la investigación y exploración para un determinado elemento es conveniente considerar dos factores fundamentales:

— situación actual de su mercado

— valor estratégico y previsiones a largo plazo.

Puesto que sería muy largo para los propósitos de esta publicación revisar en este sentido cada uno de los elementos de interés en la provincia de Salamanca, lo haremos a título de ejemplo para el *Estaño* que además es uno de los elementos de mayor incidencia en el sector minero salmantino.

La situación del *mercado del Estaño,* es en general, bastante buena. El precio en los tres últimos años se ha mantenido en constante aumento, a pesar de experimentar amplias y rápidas oscilaciones a lo largo de un determinado año.

Esta relativa estabilidad dentro del mercado de metales es debida a muchos y complejos factores pero principalmente a la buena relación oferta/demanda y al control que ejerce el I.T.C. (Internacional Tin Council).

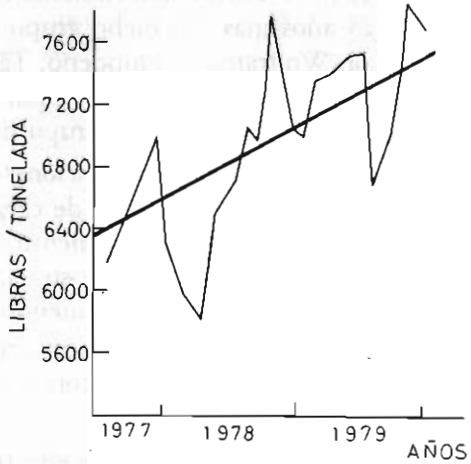

FIG. 10. *Variación del precio del mineral de estaño en los 3 últimos años. La línea de trazo más grueso corresponde a las medias anuales.*

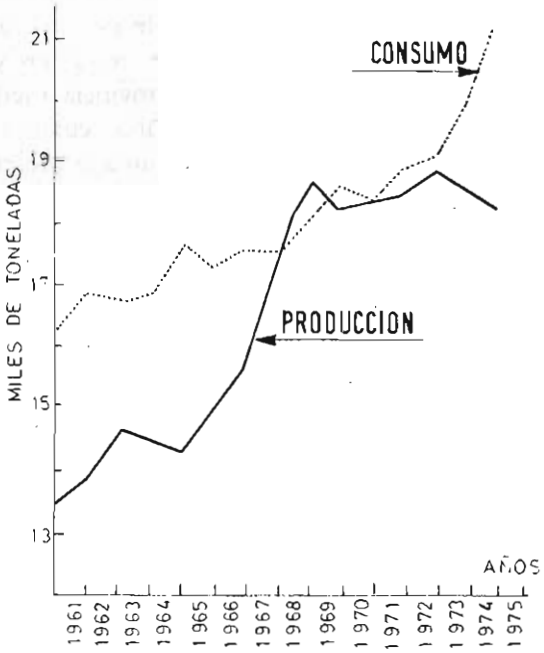

FIG. 11. *Producción y consumo de estaño en el período 1960-75.*

En cuanto a su valor estratégico queda evidenciado en el estudio publicado en 1977 por el Bureau of Mines de los Estados Unidos, en el que fijan las previsiones de la demanda a nivel mundial para los distintos metales, hasta el año 2000. Con base fundamental en la relación reservas/demanda se clasifican los recursos minerales, obteniéndose un grupo de llamados «materiales críticos» cuyo abastecimiento no está garantizado hasta el año 2000, o para 25 años más. En dicho grupo de materiales críticos figura el Estaño (junto con Wolframio, Molibdeno, Tántalo, etc.) también en España, el Estaño figura, junto con otros metales, de los que se es deficitario, como de interés prioritario dentro del grupo de recursos minerales no energéticos.

Una vez visto que las condiciones del mercado del Estaño son bastante positivas, consideremos ahora, de cara a una exploración de este elemento, la cuestión: ¿qué tipo de yacimiento de estaño es más probable encontrar y cuándo empieza a ser rentable su explotación? Es muy difícil de dar, una respuesta exacta a todo esto, teniendo en cuenta el gran número de factores que lo condiciona, y sólo una aproximación puede hacerse en base a ciertas suposiciones y comparaciones con otros yacimientos existentes hoy día, en explotación.

La producción mundial procede fundamentalmente de aluviones en el S.E. de Asia (60-70 % aproximadamente), donde hay explotaciones que utilizando grandes dragas hacen rentables leyes de hasta 100 gr./tonelada.

Los yacimientos primarios de estaño, son en general, pequeños y poco abundantes. Esta tendencia de pequeños yacimientos de estaño dispersos dentro de una determinada provincia metalogénica ha influido negativamente en las grandes compañías, cuando se plantean una campaña de exploración de este metal, debido a la preferencia, para su nivel económico, de un único y gran yacimiento. Sin embargo, la situación económica y mercado del estaño actualmente hace que se reconsideren estas posturas, y surja también el interés por todo tipo de yacimiento primario, preferencialmente por los extensos con baja ley.

Relación entre reservas y leyes de varios tipos de yacimientos de estaño

En la fig. 12 se representan leyes frente a tonelaje de reservas, utilizando datos sobre diversos yacimientos representativos de todo el mundo; aunque el número de yacimientos es reducido puede dar una idea bastante aproximada de esta cuestión en la actualidad.

Los n.° de la fig. 12 corresponden a los siguientes yacimientos:

N.°	Nombre del yacimiento	Situación	Tipo	Ley % Estaño	Reservas millones Toneladas
1	Altenberg	Erzgebirge Alemania del Este	Granito alterado/ greisen	0,25	70
2	Hub	Erzgebirge Chescoslovaquia	Granito alterado/ greisen	0,3 (0,2 WO_3)	40
3	Lost River	Alaska	Granito alterado/ Skarn	0,27	33
4	Anchor	Tasmania	Granito alterado/ greisen	0,17	5
5	Ardlethan	Australia	Granito alterado	0,55	5
6	Pemali*	Indonesia	Granito alterado/ greisen	0,018	30-40
7	Monono*	Congo	Pegmatita	0,0215	100
8	Cleveland	Tasmania	Skarn (reemplazamiento en carbonatos)	1,02	3
9	Renison Bell	Tasmania	Skarn	0,75	14
10	Mount Bischoff	Tasmania	Skarn	1,00	5,5
11	Aberfoyle	Tasmania	Sistema de Filones	0,85 + WO_3	1,60
12	Mount Wellington	Cornwall (Inglaterra)	Filones	1,37	5
13	Wheal Jane	Cornwall	Filones	1,20	5
14	Kelapa Kampit	Indonesia	Filones	1,20	2

* La amplia alteración y descomposición de los materiales permite la extracción como aluviones.

Globalmente se puede considerar que:

— Los yacimientos de tipo greisen y diseminación en granitos pueden ser los de mayor potencial dentro de los de baja ley.

— Yacimientos extensos (más de 20 millones de toneladas) son raros.

— Un yacimiento de estaño de baja ley y con escasa o nula rentabilidad, puede hacerse rentable si lleva asociado mineralización de otro elemento (wolframio, niobio, tántalo, flúor, bismuto, etc.), cosa bastante frecuente; si lleva asociado otro yacimiento de ley alta (sistema de filones, pegmatitas, etc.), o si la alteración de las rocas es tan intensa que permite su explotación de forma fácil, con técnicas de extracción semejantes a las utilizadas en aluviones.

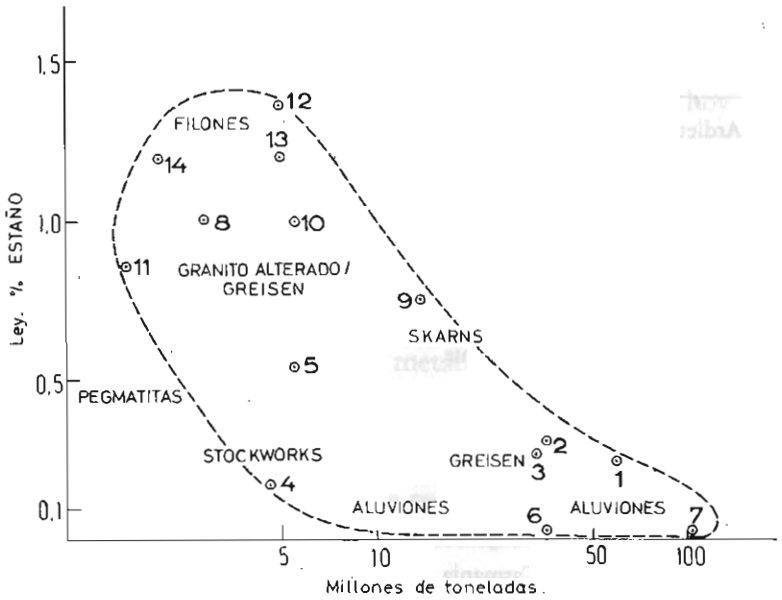

FIG. 12. *Leyes frente a tonelaje de reservas para diversos tipos de yacimientos de estaño.*

Aspectos técnicos en la Investigación Minera. Se harán a continuación algunas consideraciones sobre aquellos de mayor importancia desde un punto de vista práctico:

a) *Base cartográfica.* Resulta imprescindible para cualquier trabajo de investigación minera la existencia de un mapa topográfico de escala apropiada y suficientemente fiable, sobre el que representar todos los aspectos

geológicos y datos técnicos que se recopilen en las distintas fases del proceso. Este aspecto suele olvidarse con frecuencia en la minería poco desarrollada y es uno de los principales motivos de descontrol, que da paso a las informaciones subjetivas y siempre confusas (cuando no totalmente equivocadas), que tan a menudo se recogen en determinados ambientes mineros.

La restitución fotogramétrica realizada por una casa especializada, permite en poco tiempo y en condiciones económicas aceptables, obtener un plano base sobre el que representar los datos de la investigación.

b) *Análisis químicos.* Dentro de este capítulo hay que hacer hincapié en algunos factores determinantes como son: la precisión del análisis y el límite de detección (dejando en un plano más secundario, otros tales como, rapidez del análisis, precio, etc.).

Tanto la precisión como el límite de detección, exigible o necesario en cada caso, son función del tipo de prospección y de las características geoquímicas del elemento de interés. Por supuesto que ambos factores también están condicionados por el laboratorio de análisis y sus técnicas analíticas. En general, las técnicas de análisis más adecuadas para este tipo de trabajos son: colorimetría, absorción atómica, fluorescencia de rayos X (en función del tipo de material y del elemento a analizar). En definitiva hay que hacer constar, que este problema es complejo y requiere mucho cuidado la elección de un determinado método. A título de ejemplo, solamente se puede hablar de errores tolerables (precisión) en torno al 10 % relativo y límites de detección que sean al menos semejantes a las concentraciones normales del elemento de interés en el tipo o tipos de rocas de la región estudiada (con el fin de que destaque cualquier anomalía geoquímica).

c) *Sondeos.* Dentro de los diversos tipos, por percusión y por rotación, es muy conveniente tener en cuenta para la elección del método más apropiado fundamentalmente lo siguiente:

— profundidad
— eficacia de la perforación
— tipo de muestra obtenida
— economía del método.

A continuación se harán algunas consideraciones de tipo general e interés práctico:

La perforación por percusión tiene ventajas en cuanto a su gran velocidad para sondeos relativamente cortos (hasta 50 metros); y la obtención de

gran volumen de muestra, muy interesante en casos de dispersiones puntuales del mineral (por ejemplo yacimientos de casiterita de baja ley).

Los sondeos por rotación ofrecen ventajas, tales como la obtención de testigos sin modificaciones, profundidad prácticamente ilimitada y posibilidad de realizarlas en cualquier dirección del espacio (verticales, horizontales, inclinados).

d) *Condiciones hidrogeológicas.* Es muy importante evaluar previamente a cualquier explotación, los recursos de agua existentes en el área del yacimiento y los medios necesarios para su aprovechamiento y evacuación.

e) Otros factores a considerar de cara a una futura explotación son: red viaria, recursos energéticos, y estructura socioeconómica de la región.

Ya en una etapa de investigación inmediata a la explotación, o incluso dentro de ella en muchos casos, es de suma importancia establecer el *rendimiento* óptimo dentro de las posibilidades del yacimiento. En este sentido es ilustrativa la figura 13 (cálculos para 1'.000.000 de toneladas y 1.000 ptas./kg. de mineral).

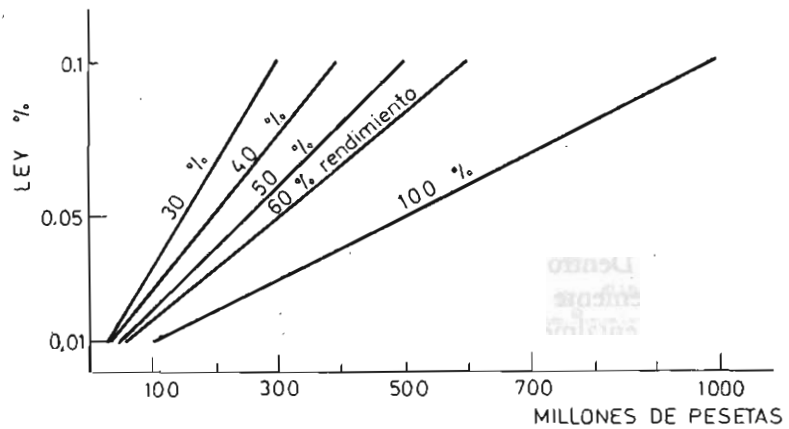

FIG. 13. *Beneficios frente a ley del yacimiento para distintos grados de rendimiento.*

Se ve, por ejemplo, que a medida que aumenta la ley del yacimiento la influencia del rendimiento del proceso industrial de recuperación se hace notar más en los beneficios obtenidos, como es lógico. Este hecho generalmente no parece merecer mucha consideración en algunas explotaciones,

donde se da prioridad a la obtención de beneficios rápidos, en detrimento de la duración de la explotación y aprovechamiento integral de la mena.

En consecuencia, y dado que hoy día no hay una técnica capaz de conseguir rendimientos muy elevados (especialmente en separaciones gravimétricas) es prácticamente imprescindible recurrir a la obtención de un *preconcentrado* donde las pérdidas del mineral sean muy bajas. Posteriormente se trata este preconcentrado con técnicas más sofisticadas (electrostáticas, electromagnéticas, flotación, etc.) de alto rendimiento. Esto es perfectamente viable económicamente puesto que los volúmenes a tratar se han reducido muchísimo. En este mismo sentido hay que considerar otro factor fundamental en el rendimiento como es la *clasificación granulométrica* previa a cualquier proceso, y especialmente en los métodos gravimétricos donde volumen y densidad son los factores decisivos.