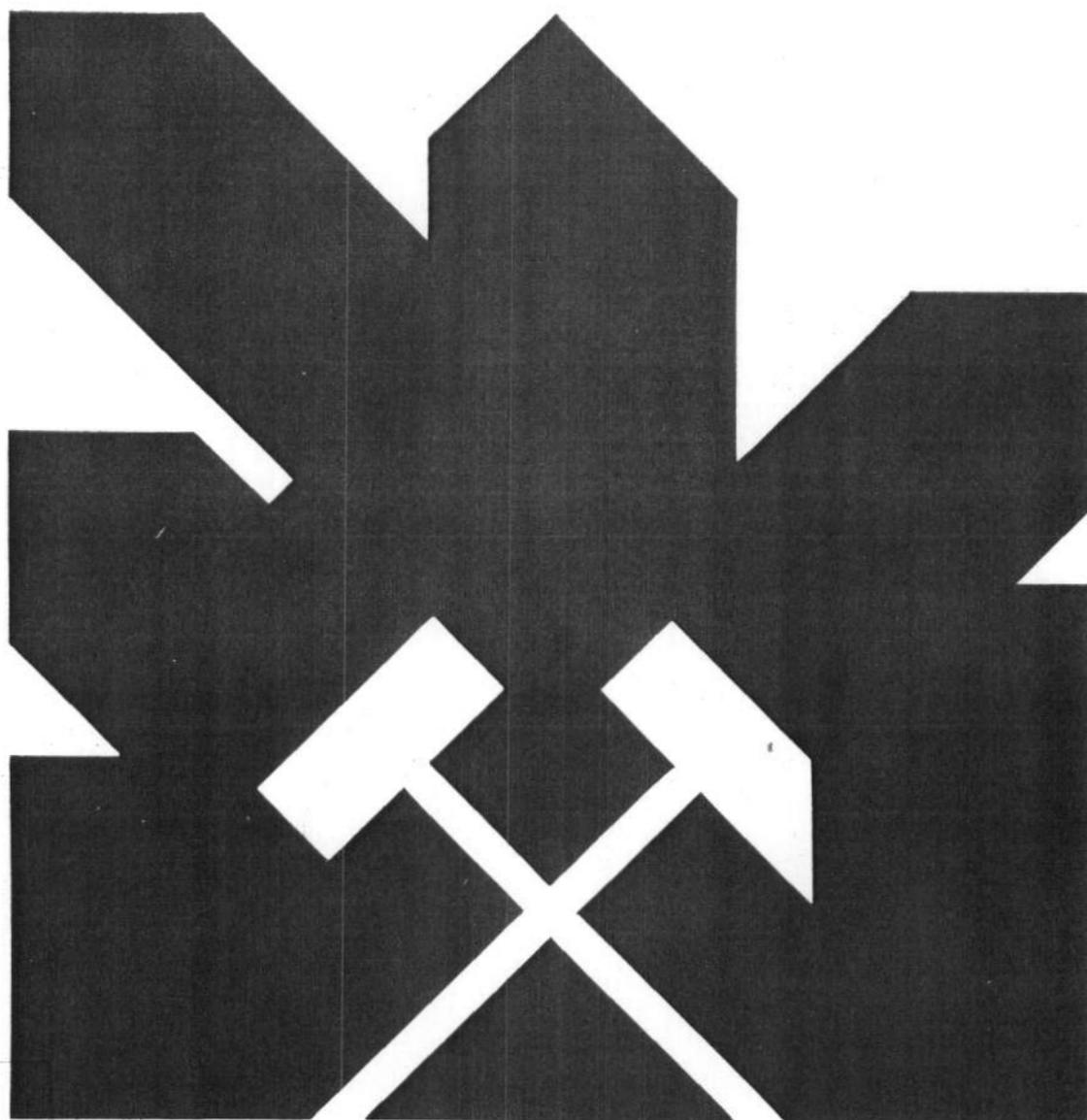


MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA  
SECRETARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

## ESTUDIO DE LA SITUACION DE LA MINERIA DEL ALUMINIO



33 INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

10833

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA  
**INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA**

ESTUDIO DE LA SITUACION DE LA MINERIA  
DEL ALUMINIO

Diciembre de 1982



*El presente estudio ha sido realizado por la Empresa:  
Economía y Comercialización para la Minería y la In--  
dustria, S.A. (E.C.O.M.I.N.S.A.) en régimen de contra-  
tación con el Instituto Geológico y Minero de España.*

## INDICE DEL ESTUDIO

	<u>Páginas</u>
1.- INTRODUCCION.....	1
2.- MINERALES ALUMINOSOS.....	4
2.1. Rocas detríticas.....	6
2.2. Rocas critalinas.....	13
3.- MINERALES ALUMINOSOS PARTICULARES.....	16
3.1. Rocas con fosfato de alúmina.....	19
4.- PRINCIPALES MENAS DE ALUMINIO.....	21
4.1. Bauxita.....	23
4.2. Nefelina.....	25
4.3. Alunita.....	27
5.- PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCION DE ALUMINA.....	28
5.1. Introducción.....	29
5.2. Producto de partida.....	31
5.3. Procedimientos básicos.....	32
5.3.1. Procedimientos sódicos.....	32
5.3.2. Procedimientos cálcico-sódicos.....	38
5.3.3. Procedimientos ácidos.....	46
6.- PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCION DEL ALUMINIO ME- TAL.....	65
6.1. Proceso electrolítico Heroult-Hall.....	67

.../...

	<u>Páginas</u>
6.2. Proceso ALCAR de reducción carbotérmica.....	69
6.3. Procedimientos ALCAN, del monocloruro de aluminio.....	70
6.4. Proceso AZAL, del nitruro de aluminio.....	72
6.5. Proceso ALCOA de Electrólisis del Cloruro....	73
7.- VIABILIDAD DE IMPLANTACION INDUSTRIAL.....	74
7.1. Aspectos técnicos.....	76
7.2. Aspectos económicos.....	80
8.- RECURSOS DE MENAS ALUMINOSAS EN ESPAÑA.....	88
8.1. Exploración de menas aluminosas en la reserva del Noroeste.....	90
8.2. Programa sectorial de minerales de aluminio . Subsector 1. Area 3. La Llacuna (Barcelona-Tarragona).....	95
8.3. Programa sectorial de minerales de aluminio . Subsector 1. Area 4. Fuentespalda (Teruel-Tarragona).....	96
8.4. Programa sectorial de aluminio Subsector Centro. Area 1. Villacorta-Riaza.....	98
8.5. Concentración de silimanitas del Valle del Oro (Lugo).....	99
9.- CONCLUSIONES.....	101

1.- INTRODUCCION

En los últimos años y motivado fundamentalmente por la escalada del precio de los crudos petrolíferos así como por estrategias políticas internas, muchos de los países productores de bauxita se asociaron en la IBA y adoptaron de forma unilateral aumentos de precio del mineral al tiempo que fueron estableciendo una serie de términos y condiciones de importante trascendencia.

Frente a estas medidas, los productores de aluminio acortaron la producción del metal, y comenzaron a desarrollar recursos de bauxita en países no alineados en la estrategia general de países productores, tales como Brasil y Australia. Debe significarse a este respecto que las reservas mundiales de bauxita cubren en la actualidad más de 200 veces los requerimientos anuales de este mineral.

Aunque sin duda la bauxita permanecerá siendo el mineral utilizado, prácticamente en exclusiva, para la obtención de alúmina durante la década de los años 80, y el proceso Bayer y sus variantes seguirán significando la vía tecnológica por excelencia.

Para la obtención de alúmina, no deja de ser significativo el he-

.../...

cho de que tanto Estados Unidos como la URSS, ambos productores y consumidores de  $Al_2O_3$  de primer orden, hayan dedicado una especial atención a la investigación de tratamientos para el aprovechamiento industrial de minerales no bauxíticos, y que en el caso de este último país se ha visto coronada por el éxito aún en circunstancias específicas. Existen dos motivaciones claras para una actuación así y que son perfectamente válidas para el caso de España: la inexistencia de minerales bauxíticos y la necesidad de independencia respecto a los cada vez más problemáticos suministros de bauxita.

De cualquier forma las alternativas al proceso Bayer para el tratamiento de minerales no bauxíticos tienen aún un incierto porvenir y muchos aspectos técnicos y económicos que resolver. No debe ignorarse que las plantas comerciales de alúmina requieren una inversión tan fuerte que son necesarios hasta 30 años en ocasiones para amortizar la inversión realizada.

Si bien a nivel de laboratorio ha sido posible concebir y desarrollar numerosos procedimientos alternativos, en la etapa siguiente de investigación que sería la experiencia en planta piloto, se necesita una inversión de varios centenares de millones de pesetas, multiplicándose su valor al menos por cien cuando se trate de una implantación a escala industrial.

2.- MINERALES ALUMINOSOS.

Los minerales de aluminio constituyen una parte importante de la corteza terrestre. Se puede considerar una capa superficial de 16 km., en la que el aluminio supone un 8,3% de la composición en peso, bajo la forma de óxidos y silicatos más o menos complejos.

Estos compuestos constituyen estructuras más complejas como las rocas, que se clasifican según sus características y origen, en tres grandes grupos:

- Rocas detríticas, residuales o sedimentarias.
- Rocas cristalinas.
- Rocas metamórficas, resultantes de la recristalización de antiguas rocas preexistentes.

### 2.1. Rocas detríticas.-

Las bauxitas y lateritas que constituyen actualmente la mayor parte de la materia prima empleada para el proceso Bayer, para producción de alúmina, son rocas detríticas residuales, formadas en condiciones climáticas tropicales y subtropicales. Su consumo anual supera la cifra de 100 millones de toneladas. Las reservas conocidas, económicamente explotables, de bauxitas y lateritas bauxíticas, se han evaluado entre 15 y  $20 \times 10^9$  toneladas.

Cabe significar la lejanía existente entre las zonas de producción minera y las áreas de consumo por una parte y las zonas donde se localizan las reservas minerales por otra.

Se puede prever que en el momento que se pongan en explotación las reservas de mineral de estas zonas, se incrementarán los costes y los problemas de logística y de implantación gravarán sin duda, el precio de la materia prima.

Para economizar reservas a nivel mundial de los minerales de aluminio clásicos, bauxita fundamentalmente, y disminuir los costes de transporte, se ha tratado de acudir a otras materias

.../...

primas para la producción de alúmina.

Para que un yacimiento de rocas aluminosas pueda ser considerado como un recurso de aluminio, propiamente dicho, deberá satisfacer ciertos criterios, tales como:

- a) La importancia de las reservas, que deben corresponder a una posibilidad de explotación de 30 a 40 años sobre la base de una producción anual de 1 millón de toneladas de alúmina.
- b) Contenido de alúmina extraíble por el procedimiento seleccionado, superior al 15%.
- c) La naturaleza de los elementos que acompañan al aluminio en la roca, su influencia sobre la pureza del aluminio producido y el consumo de reactivos del proceso de tratamiento elegido. Especial atención a los contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
- d) La situación geográfica del yacimiento y su influencia sobre los problemas de transporte y logística.

De forma general, si se consideran rocas aluminosas aquellas -- que contienen más de un 15% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , las rocas sedimentarias -

.../...

son las más frecuentes. Tanto las arcillas como los esquistos, pertenecen a esta categoría.

Las rocas arcillosas están, principalmente, constituidas por minerales de arcilla, entre los que se pueden considerar los cuatro grupos siguientes:

- 1) Grupo de la caolinita. Comprende caolinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2 - 2\text{H}_2\text{O}$ ), anauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$ ), haloisita-endellita ( $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 4\text{H}_2\text{O}$ ) y la alofana, gel de silicato de alúmina, hidratado.
  
- 2) Grupo de las arcillas micáceas. La ilita (hidromoscovita o monthermita) es el término general para los constituyentes de este grupo. Es el mineral arcilloso más abundante en los esquistos paleozóicos. Está igualmente muy extendido en numerosas rocas sedimentarias. Un análisis químico representativo puede ser: 51%  $\text{SiO}_2$ , 26%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y 6,2% de óxidos de hierro.
  
- 3) Grupo de la montmorillonita. Los minerales de este grupo -- son los componentes de la bentonita. La fórmula general de la montmorillonita:  $4\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$ , lo cual indica que -

.../...

el ratio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  es dos veces mayor que en la caolinita.

- 4) Grupo de las cloritas. Las cloritas son silicoaluminatos ferrromagnésicos, abundantes en las rocas sedimentarias y cuya composición media puede estar representada por la fórmula --  
 $3 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 5(\text{Mg-Fe})\text{O}, 4\text{H}_2\text{O}$ .

El contenido en alúmina de las arcillas y esquistos es muy variable, dependiendo de la naturaleza de los minerales constituyentes. El contenido teórico más elevado, un 39,5%, corresponde a la caolinita pura.

Las arcillas componentes de caolinita son minerales de aluminio interesantes por su contenido relativamente alto en alúmina, al tiempo que una cantidad pequeña en hierro, óxidos alcalinos y alcalinotérreos, elementos que provocan problemas en los distintos procedimientos.

Los depósitos de arcillas caoliníticas más importantes que se conocen, se encuentran en los Estados Unidos. Están constituidos por unas reservas de mineral, relativamente puro, cifradas en  $9 \times 10^9$  t. de las que  $3 \times 10^9$  t. son alúmina.

.../...

También en Europa existen arcillas caoliníticas, casi puras, pero su explotación actual se dirige sobre todo a la industria cerámica. Otras arcillas de calidad inferior, pero que pueden ser utilizadas como materia prima en la industria del aluminio están muy generalizadas y abundan en algunos países europeos. Su composición oscila entre los siguientes valores:

<u>Pérdidas al fuego</u>	<u>Si O<sub>2</sub></u>	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub></u>
4,5 - 13,4%	45,2-68,7%	18,1-37,4%	0,6-6,8 %
	<u>K<sub>2</sub> O</u>	<u>Ti O<sub>2</sub></u>	
	0,4 - 4%	0,9 - 2%	

Las arcillas consolidadas se denominan esquistos cuando se presentan estratificadas. La diagénesis conduce a la formación de esquistos. Cuando la diagénesis es especialmente intensa, se llega a los esquistos pizarrosos o pizarras cristalinas, ya consideradas como rocas metamórficas.

Este tipo de material puede también considerarse mineral de aluminio, tanto por su abundancia como por ser su contenido de alúmina, relativamente alto. Los esquistos de las regiones francesas de Normandía y Bretaña que se prolongan en los esquistos piza--

.../...

rrosos de Angers , constituyen, de esta forma, unas reservas --  
prácticamente inagotables. Un análisis típico del esquisto bre  
tón. puede ser el siguiente:

<u>Pérdida al fuego</u>	<u>Si O<sub>2</sub></u>	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>K<sub>2</sub> O</u>
6,2%	51,1%	25,2%	9,3%	3,2%
	<u>Na<sub>2</sub> O</u>	<u>Ti O<sub>2</sub></u>	<u>Ca O</u>	<u>Mg O</u>
	1,2%	1,7%	0,1%	1,3%

En ciertos casos, el material aluminoso está asociado a una ro  
ca sedimentaria carbonosa que puede ser utilizada como fuente  
de energía. Este es el caso de los esquistos hulleros que con  
tienen de un 20 a un 33% de alúmina. Al ritmo actual de la pro  
ducción mundial de carbón puede obtenerse por este medio más -  
de 100 millones de toneladas/año.

La producción anual de esquistos y las reservas que constitu--  
yen las escombreras, tanto en Estados Unidos como en Europa, -  
son considerablemente importantes y suficientes para aprovisio  
nar de materias primas las industrias para la obtención de alú  
mina. Los esquistos hulleros, suelen contener, por otra parte,

.../...

una materia carbonosa residual que les confiere un poder calorífico que oscila entre las 400 y 2.000 calorías/gramo, circunstancia especialmente interesante. La energía necesaria para la calcinación del mineral se cifra en las 350-400 calorías/gramo.

## 2.2. Rocas cristalinas.-

Las rocas endógenas o cristalinas se clasifican según diversas familias de rocas, cuyas composiciones químicas medias porcentuales se expresan a continuación:

TIPO DE ROCAS	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	Oxidos Hierro	MgO
Sienita nefelinica	55	21	7	9	2	4	0
Sienita	60	16	4	4	4	6	2
Granito	70	14	4	4	2	3	1
Diorita	57	17	2	3	7	8	4
Gabro	49	16	1,2	3	10	11	7
Anortosita	51	22	1	3	10	8	3

Como puede observarse la anortosita es la roca más rica en alúmina. Desde el punto de vista mineralógico está constituida por -- plagioclasa básica o feldespatos calciosódicos quedando su composición química comprendida entre la de la albita  $6\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$  y la anortosita  $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}$ . Existen grandes yacimientos de anortosita en Estados Unidos, Noruega y Canada.

Las sienitas nefelínicas son rocas constituidas en su mayor parte por feldespatos y nefelina. La nefelina es un mineral petrogénico de fórmula  $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3(\text{K}, \text{Na})\text{O}$ . Las concentraciones conocidas más importantes se localizan en la península de Kola (URSS),

.../...

unos 2.000 km<sup>2</sup>, en Transvaal y en las proximidades de Julianehaab (Groenlandia).

Las rocas ígneas incorporan frecuentemente leucita,  $KAlSi_2O_6$ . Las rocas con leucita se caracterizan por un escaso contenido en sílice y un significativo porcentaje de potasa. Un análisis químico porcentual, característico de estas rocas puede ser el siguiente:

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	FeO	$K_2O$	$Na_2O$	CaO	MgO	$TiO_2$
46,9	16,33	4,22	4,14	7,58	2,75	9,72	5,03	1,22

En la región italiana del Vesubio han sido explotadas estas rocas y se ha identificado su presencia masiva en determinadas áreas - de Estados Unidos, Alemania, Checoslovaquia y África del Sur.

Las rocas metamórficas presentan una constitución que depende estrechamente de la naturaleza de la roca original y de la intensidad del metamorfismo registrado. De esta forma, una roca arcillosa o caolinítica, que contenga algunas impurezas podrá originar según la intensidad del metamorfismo:

.../...

- . Esquistos arcillosos con formación de ilita.
- . Esquistos sericíticos, resultantes de la transformación de la caolinita en sericita por deshidratación y aporte de potasa.
- . Esquistos micáceos con la transformación de sericita en muscovita ( $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2 \text{ K}_2)\text{O}$ ).
- . Esquistos con minerales, donde el exceso de aluminio ha permitido la formación de silicatos de aluminio, andalucita y distena ( $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$ ) y las impurezas de hierro y magnesio han originado silicatos aluminosos y ferromagnésicos como la cordierita y la estauroлита.

Estos silicatos son difícilmente atacables y sólo parece que pueden considerarse como minerales de aluminio aprovechables en un plazo de tiempo muy dilatado.

### 3.- MINERALES ALUMINOSOS PARTICULARES

- Rocas con alunita

La alunita es un sulfato básico de aluminio y de potasio, hidratado, de fórmula  $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ . Es un mineral de alteración formado en un medio ácido en arcillas, esquistos y rocas volcánicas.

No existen muchos yacimientos importantes de rocas con alunita. En Bakon (URSS) se encuentra el yacimiento de Zaglik en explotación. En Estados Unidos hay depósitos en los estados de Nevada y Utah; en este último el yacimiento de Cedar City con unas reservas de 600 millones de toneladas de mineral con un 12 a un 16% de  $Al_2O_3$  ha permitido su aprovechamiento para la producción de alúmina. Existen depósitos también en Hungría, Australia, España y Méjico. En este último país y en base a un yacimiento de 115 millones de toneladas con un 15% de  $Al_2O_3$  se explota mineral con destino a la producción de sulfato de alúmina.

El tratamiento convencional consiste en una tostación reductora para descomponer el sulfato de alúmina, seguida de la ex—

.../...

tracción mediante lixiviación alcalina del sulfato potásico y de alúmina, separandoles por cristalización.

### 3.1. Rocas con fosfato de alúmina.-

Los fosfatos aluminosos resultan de la alteración de sedimentos-arcilloso-fosfatados. Los minerales constituyentes son fosfatos hidratados, con aluminio únicamente, tales como la wavelita o -- con aluminio y calcio, como la crandalita, y los minerales arcillosos asociados.

En Brasil se localizan los yacimientos del estado de Maranhau -- con unas reservas de 20 millones de toneladas y un contenido del 25 al 30% de  $Al_2O_3$ .

En Florida, Estados Unidos, existen fosfatos arcillosos de calidad mediocre con un 8-15% de  $Al_2O_3$  recubriendo fosfatos hidratados de calcio. Las reservas se estiman en varios cientos de millones de toneladas.

En un yacimiento próximo a Thiés (Senegal) se han podido estimar 100 millones de toneladas con un contenido del 30% de  $Al_2O_3$ .

Se han aplicado procedimientos ácidos y alcalinos a los fosfatos de alúmina. Los procedimientos alcalinos conducen a la produc—

.../...

ción, al margen de la alúmina, de un fosfato alcalino que es necesario poder dar salida.

Los procedimientos ácidos permiten considerar la producción de ácido fosfórico.

#### 4.- PRINCIPALES MENAS DE ALUMINIO

Una vez analizados los minerales aluminosos y la naturaleza de las distintas rocas donde se pueden localizar, se describe sucintamente, a continuación, las tres menas que pueden ser consideradas como tales desde un punto de vista industrial: bauxita, nefelina y alunita.

#### 4.1. Bauxita.-

Teóricamente denomina al hidróxido de aluminio natural ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ) pero normalmente dá nombre a una mezcla de composición indeterminada de óxidos de aluminio hidratados. Puede en consecuencia considerarse más como una roca que como un mineral entre cuyos constituyentes se encuentra la gibbsita (hidrargilita),  $Al(OH)_3$ , boehmita  $\delta AlO OH$  y diásporo  $\alpha AlO OH$ .

El límite de explotabilidad de la bauxita desde el punto de vista de mena de aluminio se sitúa entre los límites siguientes:

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| - Contenido de $Al_2O_3$ | 45-50%                   |
| - Contenido de $SiO_2$   | Inferior al 4%           |
| - Contenido de Mn        | Inferior al 1,5%         |
| - Contenido de $TiO_2$   | Inferior al 3%           |
| - Contenido en Fe        | Tiene función secundaria |

Si el diásporo representa un porcentaje significativo los procesos tipo Bayer tienen dificultades relativas a la solubilidad de la materia prima.

Cuando el  $SiO_2$  está comprendido entre el 12 y el 15% las bauxi--

.../...

tas se pueden emplear para la producción de cementos aluminosos. Si el porcentaje de hierro es bajo ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 3\%$ ) aunque el contenido de  $\text{SiO}_2$  sea elevado, caso de las bauxitas denominadas "blancas", su utilización se desvía a la industria química para el blanqueo y purificación de aceites.

4.2. Nefelina.-

Se trata de un mineral petrogenético componente entre otras rocas, de las sienitas, fonolitas y basaltos nefelínicos y cuya fórmula es  $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{K}, \text{Na})\text{O}$ .

La nefelina se suele encontrar con mayor abundancia en las denominadas sienitas nefelíticas donde llega a constituir el 80%. También se localiza en pegmatitas y rocas volcánicas.

Existen grandes yacimientos en la URSS, localizados en la península de Kola y en Lago Baikal, con reservas estimadas del orden de 100 billones de toneladas.

La nefelina que se utiliza para obtener alúmina presenta normalmente la composición porcentual siguiente:

<u><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></u>	<u><math>\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}</math></u>	<u><math>\text{SiO}_2</math></u>	<u>Oxidos restantes</u>
30	20	43	7

.../...

En el área de Ontario, Canadá existen sienitas nefelíticas con la siguiente composición porcentual:

$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{23}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{4}$	$\frac{\text{SiO}_2}{60}$
------------------------------------	--------------------------------	---------------------------

#### 4.3. Alunita.-

Es un sulfato básico de potasio y de aluminio hidratado, cuya fórmula es  $K Al_3 (SO_4)_2 (OH)_6$ , de fácil descomposición por calor en  $SO_3$  y  $Al_2O_3$  y buena solubilidad en agua del  $SO_4H_2$ , de  $Al_2O_3$  y de  $SO_4K_2$ .

Los yacimientos más importantes se sitúan en el estado de Utah y Washington (USA), con unas reservas cifradas alrededor de 9 millones de t., con un contenido de  $Al_2O_3$  del 20%.

En el Cerro de la Tiza, Puerto Rico, se localizan 285 millones de toneladas, aunque su grado de diseminación, reduce su importancia considerablemente.

En la República Popular China, se estiman unas reservas del orden de 280 millones de toneladas de una alunita con aproximadamente un 25% de  $Al_2O_3$ .

También en la región del Cáucaso (URSS), existen alrededor de 100 millones de toneladas con un 15% de alúmina.

5.- PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCION DE  
ALUMINA

### 5.1. Introducción.-

El primer procedimiento para la fabricación del aluminio lo inventó Sainte-Claire Deville en 1854. Se trata de un proceso químico consistente en reducir cloruro de aluminio con sodio en un baño de dicloruro fundido.

Sainte-Clarie Deville reemplazó posteriormente la reducción química por una reducción electrolítica en el mismo baño, preparando previa extracción de la alúmina de la bauxita mediante un tratamiento con carbonato sódico, procedimiento también llamado — "Sinter" seguido de una cartocloruración en baño de sal fundido.

En 1886 aparece el procedimiento electrolítico Héroult-Hall y en 1888 el proceso Bayer para producción de alúmina mediante el empleo de sosa caústica. Desde entonces, hace ya más de un siglo, no ha cambiado sensiblemente la tecnología de obtención de alúmina y es un paso intermedio imprescindible para la obtención de aluminio metal.

Si bien existen dos excepciones de discreto relieve, el procedimiento de ALCAN del monocloruro de aluminio y el procedimiento ALCOA para tratar caolines y arcillas de alta pureza, los demás

.../...

procedimientos parten de la alúmina para obtener aluminio metal.

El procedimiento Bayer está absolutamente implantado y ha desplazado cualquier otra alternativa industrial semejante en lo que a producción de alúmina se refiere. Mediante el proceso Bayer convencional o sus variantes se obtiene más del 90% de la alúmina producida en el mundo.

Para producir aluminio metal permanece el esquema primitivo de electrolísis de Héroult-Hall.

## 5.2. Producto de partida.-

Se considera como materia prima para el proceso de obtención de alúmina aquellas rocas con un contenido superior al 16% de  $Al_2O_3$ . Desde el punto de vista de su tratamiento se pueden clasificar - como minerales básicos y ácidos.

La proporción entre el número de moléculas de óxidos alcalinos y alcalino-térreos,  $K_2O$  aparte, y el número de moléculas de alúmina contenidas en el mineral permite establecer tal clasificación

Los minerales silicoaluminosos, en los que este cociente es superior a 0,3, requieren los tratamientos básicos de acuerdo con el esquema general del diagrama que figura a continuación. Los minerales donde tal cociente es menor de 0,3 son tratados según el - esquema general para procedimientos ácidos que también se acompaña.

5.3. Procedimientos básicos.-

5.3.1. Procedimientos sódicos.

a) Proceso Bayer.- La composición química de las bauxitas tratadas por el proceso Bayer, varía entre los siguientes porcentajes:

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
1-8	40-60	5-30	2-4	12-30

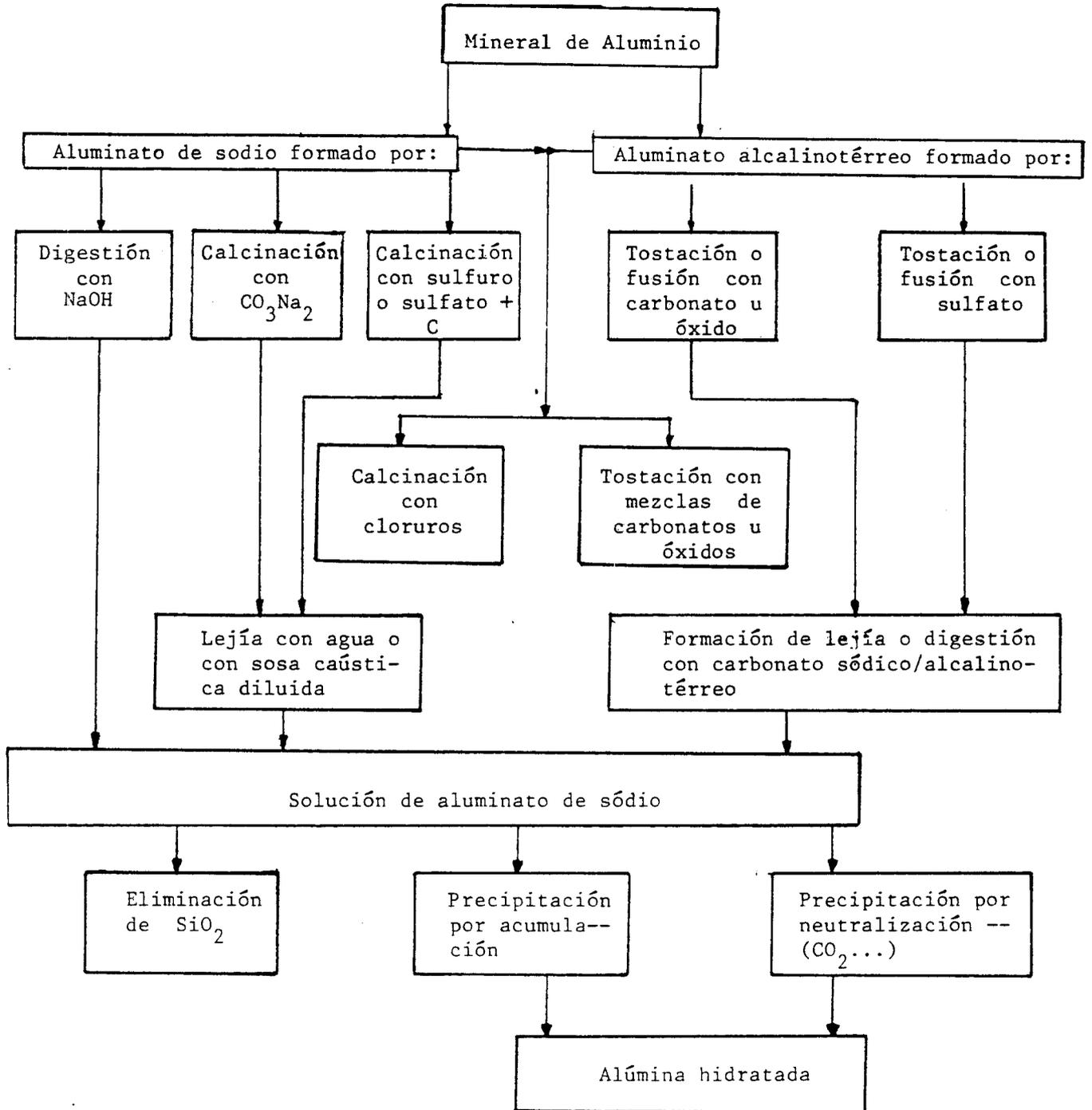
Por otra parte las especificaciones normales para una bauxita de calidad metalúrgica son las siguientes:

	<u>Trihidratada</u>	<u>Trihidratada-Monohidratada (%)</u>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	mín. 55	mín. 47
$\text{SiO}_2$	máx. 5	máx. 4
FeO	máx. 1	máx. 3
$\text{P}_2\text{O}_5$	máx. 1	máx. 1
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	máx. 1	máx. 1
$\text{MnO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{V}_2\text{O}_5$	máx. 1	máx. 2

La bauxita se trata en autoclave con una solución caústica --

.../...

ESQUEMA GENERAL DE PROCEDIMIENTOS BASICOS



esencialmente sosa, con algo de aluminato sódico residual reciclado a temperatura bastante elevada, hasta 260°C en muchos casos.

Este proceso queda comprendido en la línea vertical izquierda del esquema general de procedimientos básicos.

La suspensión obtenida como resultado del ataque con sosa — caústica se decanta y filtra. Los estériles (lodos rojos) son eliminados, arrastrando óxidos de hierro y de titanio más atacados y la sílice en forma de silicoaluminato de sosa insoluble,  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O}$ . Las lejías claras son refrigeradas y mezcladas en trihidrato de aluminio que desencadena la descomposición. Se recoge posteriormente el trihidrato y las lejías son reconcentradas y recicladas.

El proceso Bayer queda definido por tres características fundamentales:

- 1.- La sílice presenta inconvenientes: fija la sosa y el aluminio arrastrado en los lodos rojos, ocasionando su pérdida. Técnicamente pueden tratarse bauxitas siliciosas pero en la práctica las pérdidas registradas establecen que el

.../...

límite económico se sitúe en aproximadamente un 10% de sílice en la bauxita.

2.- La tecnología del proceso Bayer está bastante perfeccionada. No obstante su técnica evolucionará sin duda hacia la obtención de calidades superiores de alúmina y al tratamiento de bauxitas muy variadas, todo ello sin olvidar -- los posibles ahorros energéticos.

3.- La dimensión de las plantas de fabricación bajo el proceso Bayer es considerablemente grande. Las nuevas unidades con capacidad de producción anual del orden de 3 millones de toneladas/año de alúmina, constituyen las mayores plantas hidrometalúrgicas del mundo. Suponen inversiones tan elevadas que normalmente se realizan por varias sociedades agrupadas en cooperativa.

b) Proceso Bayer americano.- Es una adaptación al tratamiento de aquellas bauxitas constituídas esencialmente por trihidrato de alúmina, gibbsita, abundantes en el continente americano a diferencia del proceso Bayer original que atiende especialmente a las que contienen preponderantemente monohidrato de alúmina, boehmita.

.../...

La disolución de la bauxita mezclada con sosa y cal se realiza de forma continua bombeándose a presión en una serie de autoclaves agitados mecánicamente.

- c) Proceso Bayer modificado. - Al invertirse las actuaciones y -- tratar en Europa bauxitas con alto contenido en gibbsita, al tiempo que en las plantas americanas se comenzaba a utilizar mineral con elevada proporción de boehmita, se ha registrado en ambos continentes una adaptación tecnológica que ha desembocado en el denominado Proceso Bayer modificado, que no es sino una mixficación del Proceso Bayer convencional y Bayer modificado.

El proceso se caracteriza por la extracción primaria del trihidrato (gibbsita) mediante un proceso de disolución con sosa a baja temperatura y débil concentración, seguido de la extracción del monohidrato (boehmita) por disolución en sosa caústica de superior concentración y a mayor temperatura.

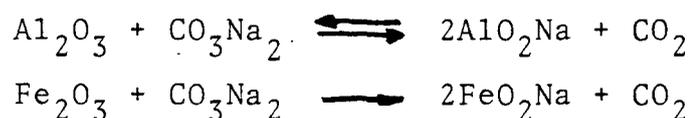
- d) Proceso Peniakoff. - Su esquema queda comprendido en la tercera línea vertical contando de izquierda a derecha, del esquema general de procedimientos básicos.

Consiste en la calcinación a  $1.200-1.400^{\circ}\text{C}$  en un horno rotato

.../...

rio de una mezcla de bauxita, sulfato de sodio y carbón. Se desprenden conjuntamente  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ ; el  $\text{SO}_2$  puede utilizarse para obtener  $\text{SO}_4\text{H}_2$  y ser reciclado. El clínquer se lixivia con una lejía caústica diluída y la alúmina es precipitada de la solución de aluminato de sosa por el  $\text{CO}_2$  desprendido del horno. Este procedimiento se extendió mucho en Alemania a partir de 1920 y durante la Segunda Guerra Mundial.

- e) Proceso Deville-Pechiney.- La bauxita se calcina junto a  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  a una temperatura de  $1.100^\circ\text{C}$ . De esta forma se originan aluminato y ferrato de sodio.



La lixiviación de la materia cocida se suele realizar por adición de licor de aluminato descompuesto. Los lodos pueden separarse por filtración.

La precipitación de la alúmina se efectúa por carbonatación utilizando  $\text{CO}_2$  procedente de los gases del horno. La alúmina obtenida suele ser bastante siliciosa.

.../...

Este proceso no puede competir económicamente con el proceso Bayer pero su combinación con él permite el tratamiento de -- bauxitas que no podrían ser rentablemente utilizadas mediante el proceso Bayer convencional.

De esta forma pueden tratarse bauxitas con alto contenido en cal, bauxitas muy siliciosas, y bauxitas con alto contenido en diásporo.

#### 5.3.2. Procedimientos cálcico-sódicos.

Estos procedimientos básicos comprenden en principio las siguientes fases:

- Tratamiento preliminar (eventual) del mineral
- Tostación o fusión
- Lixiviación de las escorias o de los clinquers
- Purificación de las soluciones
- Precipitación de la alúmina
- Recuperación de los reactivos

Los reactivos empleados en estos procedimientos, cal o sosa y cal, reaccionan con la sílice, dando lugar a silicato cálcico. En una

.../...

primera fase la alúmina se convierte en un aluminato alcalino o alcalinotérreo.

Si la alúmina está bajo la forma de aluminato cálcico es extraída por disolución, la solución es filtrada y purificada, eliminándose la sílice, y la alúmina es recuperada de la solución por carbonatación, o por hidrólisis y carbonatación cuando se requiere mejorar la pureza de la alúmina obtenida.

Si la alúmina se presenta bajo la forma de aluminato alcalinotérreo, el tratamiento de extracción es efectuado por una solución de carbonato de sodio que lo transformará en aluminato alcalino y ya se procede como anteriormente se vió.

Los residuos sólidos separados de las soluciones de aluminato alcalino están esencialmente constituídos por una mezcla de silicato bicálcico, carbonato cálcico y aluminato cálcico. Estos com-puestos pueden utilizarse como materia prima para la fabricación de cemento artificial.

Los principales procesos cálcico-sódicos se comentan brevemente a continuación:

.../...

- a) Procedimientos cálcicos derivados del proceso Pedersen.- La tostación o fusión del mineral con caliza para obtener por una parte, una mezcla de aluminato de cal donde la alúmina es susceptible de ser solubilizada y por otra de silicato bicálcico donde la transformación de la forma beta en gamma provoca la pulverización del clínquer o de la escoria obtenida.

La extracción de la alúmina se efectúa generalmente por una solución de carbonato de sosa, reciclada.

Esta solución debe ser depurada por eliminación de la sílice antes de la precipitación de la alúmina. Ello puede efectuarse por descomposición tras carbonatación o por carbonatación únicamente.

Con el proceso de fusión Pedersen se han obtenido en Noruega pequeños tonelajes de alúmina a partir de bauxitas con bajo contenido en hierro. En Suecia con este método se han realizado experiencias utilizando andalucita como mineral de aluminio.

- b) Proceso "Sínter" con caliza-sosa.- El principio general de este procedimiento consiste en la calcinación a 1.300°C en un

.../...

horno rotatorio de una mezcla de concentrados de nefelina finamente molidos junto con caliza. Se obtiene de esta forma un sinter compuesto esencialmente de silicato bicálcico y aluminato de sodio y potasio.

Tras una molienda, el sinter se lixivia con una solución de sosa caústica al objeto de disolver los aluminatos alcalinos, obteniéndose un residuo conocido como "barros de nefelina". La solución que contiene los aluminatos alcalinos es tratada con dióxido de carbono para precipitar hidróxidos de aluminio y transformarlos en alúmina por calcinación, mientras que diversos productos alcalinos se recuperan de la disolución. La solución de carbonato se evapora y el carbonato sódico precipitado es reciclado.

En la URSS, este procedimiento está desarrollado a escala industrial a partir de nefelinas que obedecen a la siguiente -- composición química:

$\frac{\text{SiO}_2}{51,5-54\%}$	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{21,5-25,3\%}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{2,4-26,\%}$	$\frac{\text{FeO}}{0,7-1,8\%}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{8,9-9,5\%}$	$\frac{\text{K}_2\text{O}}{5,3-7,6\%}$	$\frac{\text{CaO}}{1,8\%}$
$\frac{\text{MgO}}{0,3-0,7\%}$	$\frac{\text{TiO}_2}{0,6-1,2\%}$	$\frac{\text{MnO}}{0,2\%}$				

.../...

La calidad de la alúmina obtenida es muy parecida a la resultante del proceso Bayer. Los valores medios de sus impurezas más significativas son:

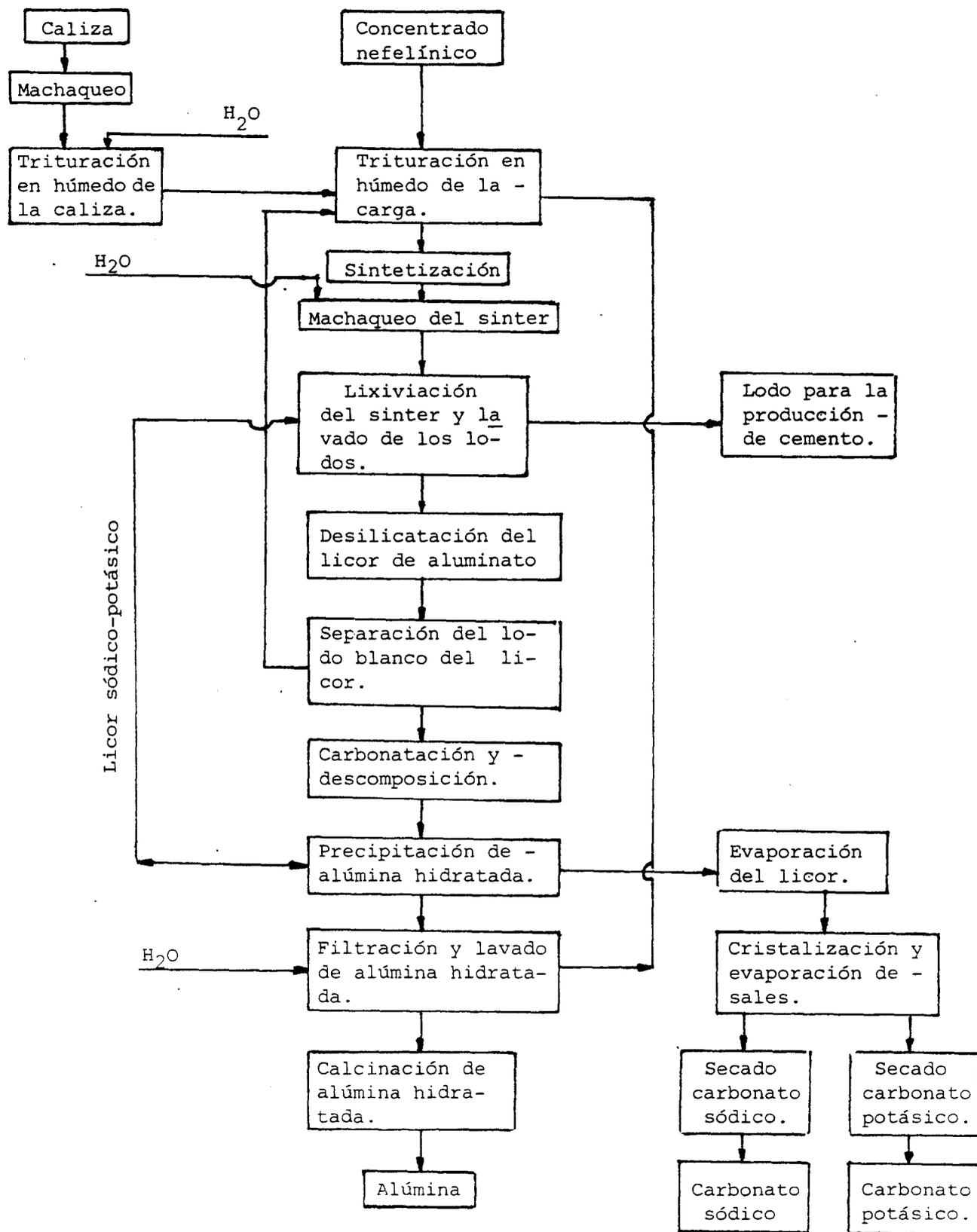
SiO <sub>2</sub> .....	0,12%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	0,31%
Na <sub>2</sub> O .....	0,37%

Este procedimiento, en líneas generales, es asimismo aplicable a las anortositas y de hecho ya se han realizado tentativas en este sentido en Estados Unidos.

En las plantas de tratamiento de nefelinas existentes en la URSS se obtienen como subproductos carbonato de sodio, carbonato potásico, galio y cemento. De cualquier forma se trata de un proceso de compleja realización y de costes muy elevados, especialmente en lo que a energía eléctrica se refiere por lo que sería muy problemático su adaptación en un país occidental.

En China, y con bauxitas cuyo hidrato de alúmina predominante era el diásporo, se ha empleado industrialmente este procedimiento.

.../...



La composición química de tales bauxitas es:

$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{57\%}$	$\frac{\text{SiO}_2}{16\%}$	$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{8\%}$	$\frac{\text{TiO}_2}{3\%}$
--------------------------------------	-----------------------------	-------------------------------------	----------------------------

Durante 26 años se ha empleado en la planta de Shantong el procedimiento "Sinter". Posteriormente se ha adoptado una combinación del proceso Bayer y la técnica de sinterización, de tal forma que la materia prima es tratada, en principio, por el sistema Bayer y los lodos resultantes se tratan mediante el procedimiento "Sinter" para recuperar la alúmina y la sosa.

- c) Proceso de desilicatación con sosa.- Consiste en tratar con sosa caliente diluída el mineral, previamente calcinado, de forma que se disocien los silicoaluminatos en  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Si la calcinación y el ataque son realizados en condiciones convencionales la mayor parte de la sílice pasa en solución al estado de silicato alcalino mientras que muy poca alúmina es atacada. El residuo de este ataque alcalino es tratado seguidamente por el procedimiento Bayer, pues la solución sódica

.../...

ca resultante de la desilicización es tratada con cal para precipitar sílice bajo la forma  $\text{CaH}_2\text{SiO}_4$  y permitir la recuperación de la mayor parte de la sosa. Este procedimiento se utiliza con minerales en los que el ratio ponderado  $\text{Al}_2\text{O}_3$  total/ $\text{SiO}_2$  es superior a 1,5, normalmente arcillas bauxíticas y a veces arcillas siliciosas.

- d) Proceso combinado Bayer-Sinterización de lodos.- Se emplea para bauxitas muy siliciosas. El mineral se ataca con  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  en combinación con el proceso Bayer. Los lodos residuales de este último tratamiento se sinterizan a  $1.200^\circ\text{C}$  en presencia de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  y  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

Si la proporción de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  es correcta, el silico-aluminato de sodio de los lodos se transforma en aluminato monosódico y silicato bicálcico.

Este proceso se puede justificar si existe una energía bruta calorífica barata y bauxitas muy siliciosas.

En Estados Unidos este proceso de combinación con el Bayer está muy extendido. Su eficacia se sitúa en el entorno de 8-19% de  $\text{SiO}_2$ , para una recuperación de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  próxima al 90%.

.../...

### 5.3.3. Procedimientos Acidos.

Los minerales contemplados por tratamientos ácidos son normalmente los silicoaluminosos pobres en alcalís y los alcalinotérreos. También los esquistos y las arcillas pertenecen a esta categoría.

Los procedimientos estudiados para tratar estos minerales, utilizan ácidos del mercado tales como sulfúrico, sulfuroso, nítrico, clorhídrico, fluorhídrico y fluosilícico. Este último ha estado propuesto para la producción directa de derivados fluorados utilizados en las cubas de alumínio.

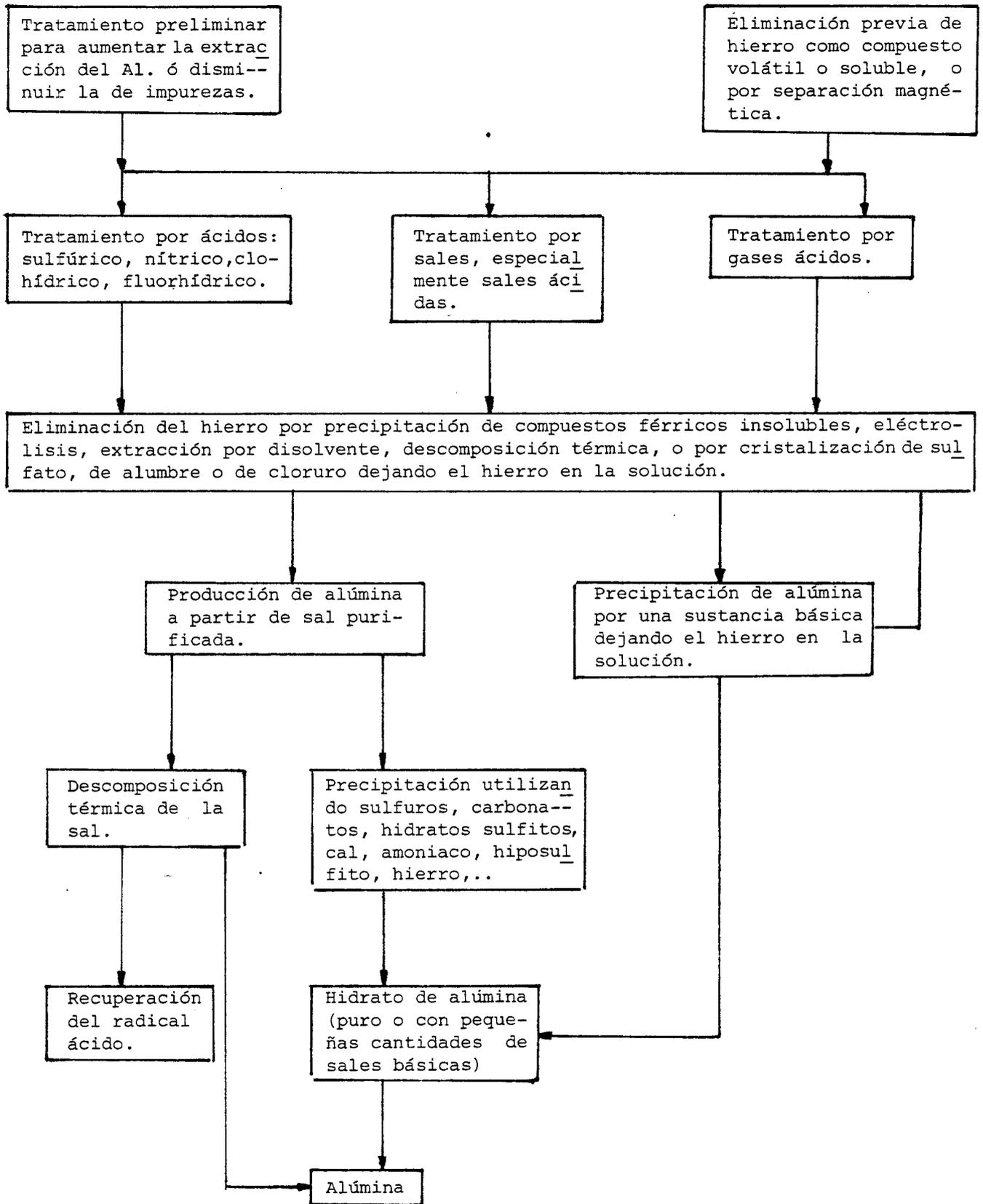
Los procedimientos ácidos comprenden los siguientes estados:

- Tratamiento preliminar del mineral para hacerlo susceptible de ser atacado por el ácido, y purificación.
- Ataque del mineral
- Conversión en sal de alumínio
- Conversión de sal en óxido
- Recuperación del reactivo ácido

El tipo de tratamiento prèvio que corrientemente se realiza es - la tostación del mineral. Las condiciones de tratamiento térmico

.../...

ESQUEMA GENERAL DE PROCEDIMIENTOS ACIDOS



varían de un mineral a otro. El tratamiento se efectúa entre los 500 y 900°C, y tiene por objeto permitir que se solubilice una cantidad máxima de alúmina. La caolinita, constituyente principal de las arcillas, se transforma en metacaolín durante el curso de este tratamiento, entre los 450 y 650°C. La reacción es endotérmica.

Esta tostación es indispensable para conseguir un buen rendimiento en la solubilización de la alúmina cuando se trata de mineral con ácidos tales como el sulfuroso, clorhídrico o nítrico.

Una vez que la alúmina se ha solubilizado y se han separado los estériles pueden seguirse dos caminos:

- a) Eliminación de las impurezas para aislar las sales de aluminio.
- b) Precipitación selectiva de una sal o de un hidróxido de aluminio.

Mediante la primera alternativa, se hace especial esfuerzo en la eliminación del hierro ya sea por extracción con disolvente o por precipitación química.

.../...

Con la segunda vía, la relativa insolubilidad del  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en las soluciones concentradas de ácido clorhídrico permite la cristalización de una sal prácticamente exenta de hierro.

La transformación de sal a alúmina puede realizarse bien por calcinación directa con recuperación de reactivos, bien por neutralización con amonio.

En lo que a recuperación de reactivos se refiere el caso de sulfatos o de cloruros, el radical puede obtenerse en los gases procedentes de la descomposición de la sal de aluminio. Si se trata de sulfatos donde la calcinación ha liberado  $\text{SO}_2 + \text{SO}_3$  la recuperación del  $\text{SO}_4\text{H}_2$  precisa un paso intermedio.

Los vapores nítricos resultantes de la descomposición de nitratos deben ser reoxidados para proporcionar ácido nítrico.

Todos estos procedimientos comportan evidentemente, pérdidas por descomposición, captación o transformación incompletas y de fugas indispensables para evitar el enriquecimiento en impurezas.

De los distintos procedimientos ácidos que han sido experimentados los más relevantes son los que se relacionan:

.../...

- Procedimiento de bisulfito amónico promovido por la Chemico.
  - Procedimiento sulfuroso (Goldschmidt) bajo presión.
  - Distintos procedimientos con ácido nítrico y con ácido clorhídrico llevados a cabo por el U.S. Bureau of Mines que serán -- analizados en un apartado posterior.
  - Procedimiento  $H^+$  (Alumínio Pechiney) cuya particular importancia le hace objeto de comentario a continuación.
- a) Procedimiento  $H^+$ . Alumínio Pechiney.- Este procedimiento permite separar y extraer la alúmina contenida en materiales aluminosos ricos en sílice tales como arcillas, esquistos, esquistos hulleros bituminosos o uraníferos. La composición mineral suele ser aproximadamente, 40-60% de  $SiO_2$ , 15-35% de -- alúmina, 1 a 10% de óxidos de hierro, 0,5 a 5% de óxidos de -- potasio y óxidos de sodio, calcio y titanio. Se admiten minerales con un contenido en  $CaO$  de hasta un 3% y de  $Fe_2O_3$  de -- hasta un 10%.

No obstante la composición química de los minerales, tratados

.../...

experimentalmente han sido:

1.- Esquistos hulleros

$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	MgO	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$
24,4%	7,8%	0,65%	4,4%	1,9%	0,25%	0,9%	57,9%

2.- Arcillas caoliníticas

- Naturales

$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	Varios
29,3%	0,75%	1,5%	35,8%	31,3	1,35%

- Secas

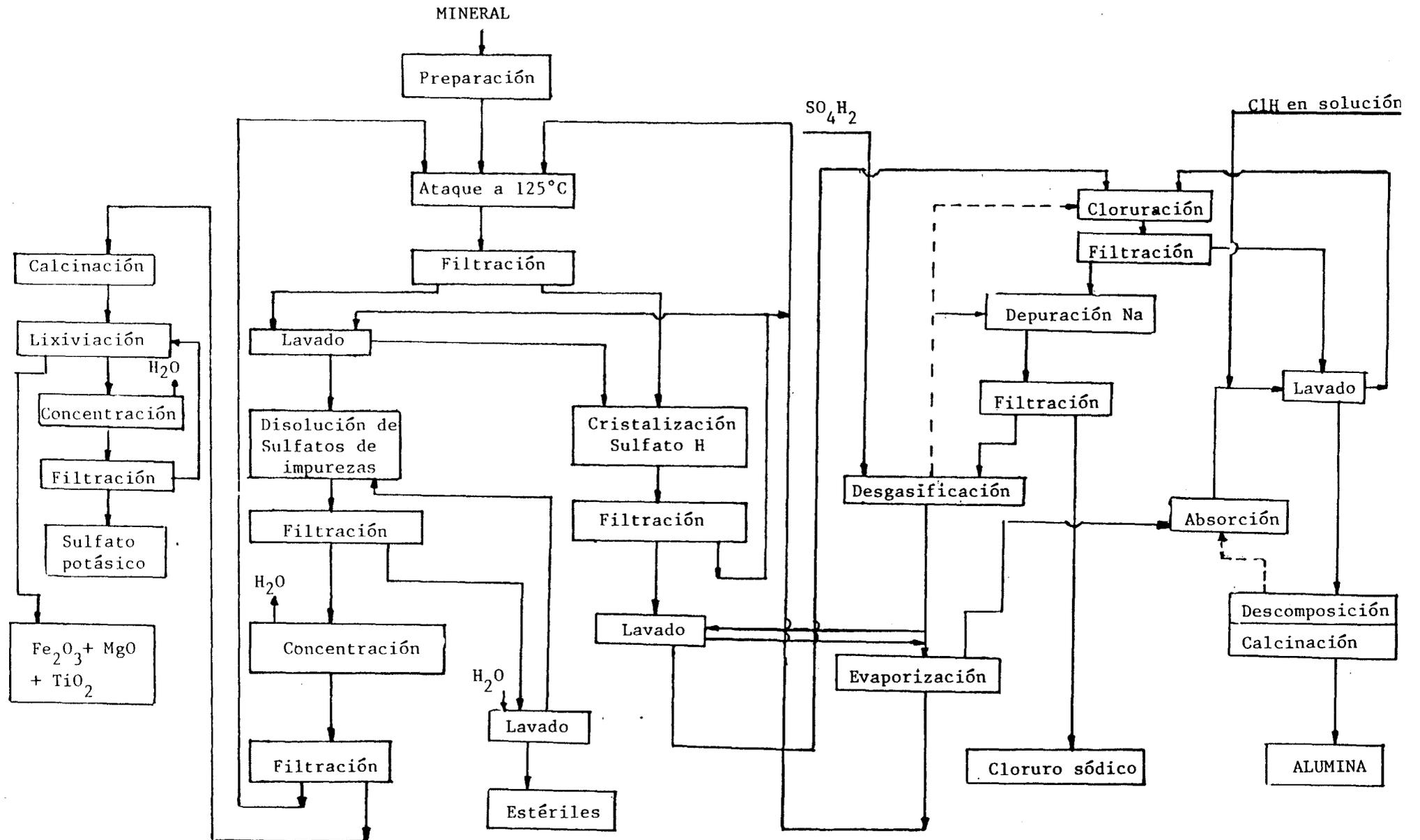
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	Varios
35,6	0,95	1,9	44,8	14,1	2,65

Es el único entre los procedimientos ácidos, que ha sido desarrollado a escala semi-industrial, 20 toneladas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /día.- Mientras el potasio se recupera bajo la forma de sulfato vendible, el sódio se elimina como  $\text{ClNa}$  sin valor.

Su esquema simplificado para el caso de esquistos hulleros --

.../...

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO H<sup>+</sup> PARA EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS CAOLINITICAS



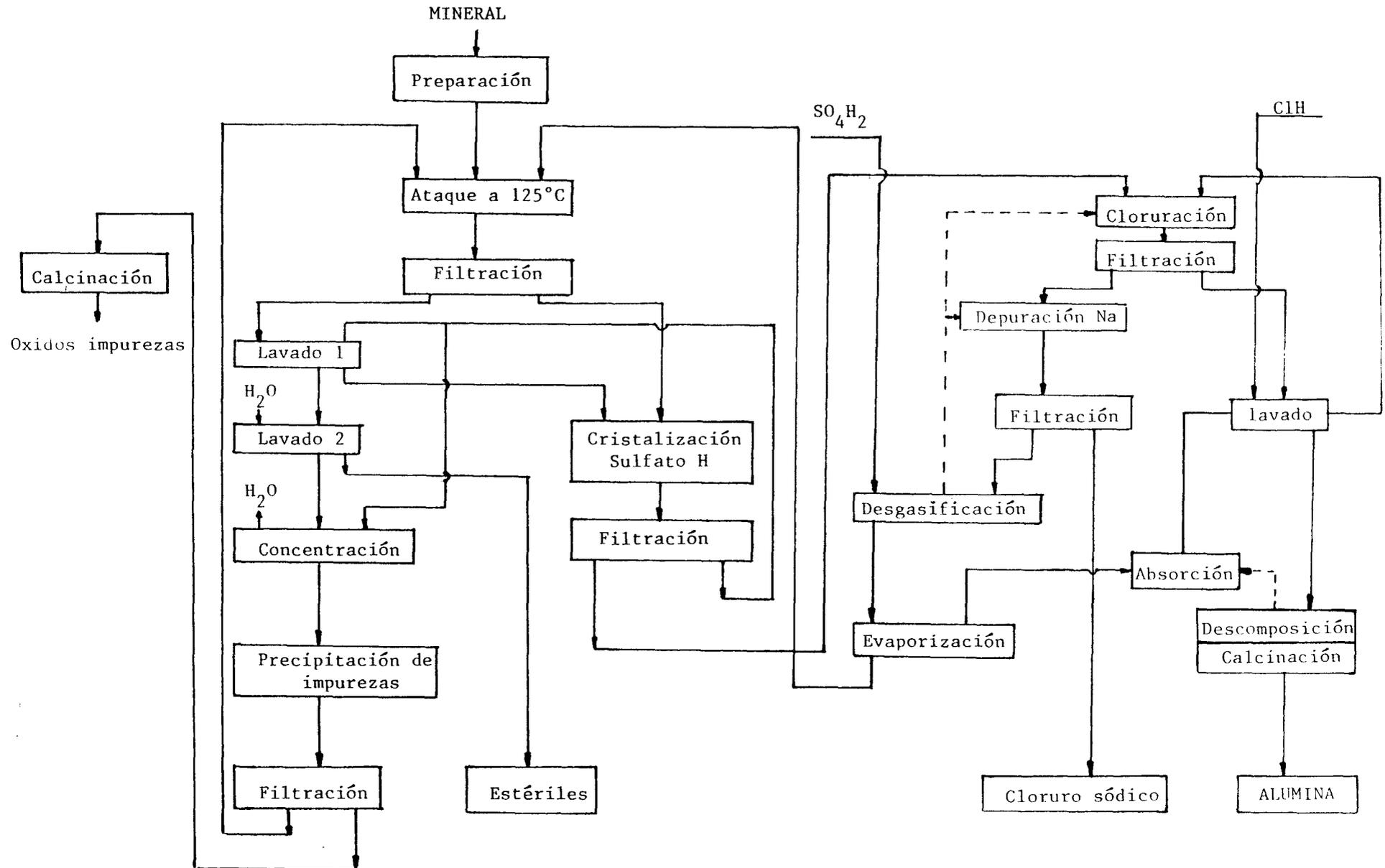
queda reflejado a continuación. El procedimiento contempla -- dos ideas directrices, la disolución selectiva de la alúmina en un medio compuesto por ácido sulfúrico concentrado y la pu rificación de la alúmina en el estado de cloruro hexahidrata do, sal que puede ser pirohidrolizada en alúmina a una tempe ratura relativamente baja, con un consumo térmico inferior al del sulfato o del nitrato y sin necesitar una reconversión -- del reactivo ácido.

El esquema presenta los pasos clásicos de la hidrometalúrgia como son:

- 1) Preparación del mineral
- 2) Ataque del mineral para disolver la alúmina
- 3) Separación sólido-líquido para eliminar las impurezas y -- los estériles de la lejía de alúmina.
- 4) Lavado de estériles con la formación de una solución de -- sulfatos de impurezas, recristalización y separación de -- los mismos.
- 5) Cristalización de la alúmina en estado de sulfato
- 6) Cristalización de la alúmina en estado de cloruro
- 7) Depuración del sodio

.../...

ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO H<sup>+</sup> PARA EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS CAOLINITICAS



- 8) Separación de ácidos sulfúrico y clorhídrico
- 9) Pirohidrólisis del cloruro para producir alúmina y regeneración del ácido clorhídrico.

El procedimiento aplicado a las arcillas caoliníticas, apenas difiere al adaptado para esquistos hulleros. Un esquema y — otro se distinguen en la preparación del mineral y en la separación de impurezas.

La calidad de la alúmina obtenida por el procedimiento  $H^+$  es más pura que la conseguida mediante el proceso Bayer como puede observarse a continuación.

<u>Elementos contenido (en ppm)</u>	<u>Alúmina Bayer</u>	<u>Alúmina <math>H^+</math></u>
Na <sub>2</sub> O	4.000-7.000	< 100
CaO	300-500	150-200
Si	60-100	60
Fe	100-250	< 50
Ti	15-25	20-25
Zn	30-100	< 5
V	5-10	< 5

- b) Procesos investigados por el U.S. Bureau of Mines.- En el año 1976 el Bureau of Mines inició la investigación de una serie

.../...

de tecnologías con el fin de obtener alúmina a partir de mate  
rias primas no bauxíticas.

En un principio se seleccionaron las siguientes alternativas:

- 1) Tratamiento de arcillas con ácido nítrico
- 2) Tratamiento de arcillas con ácido clorhídrico con cris  
talización y descomposición térmica.
- 3) Tratamiento de arcillas con ácido clorhídrico gas con cris  
talización inducida.
- 4) Tratamiento de arcillas con ácido sulfuroso
- 5) Tratamiento de anortosita mediante sinterización en CaO
- 6) Tratamiento de alunitas mediante tostación reductora y ex-  
tracción Bayer.

Una vez analizados los costes de inversión y operación así co  
mo las características técnicas de cada uno de los procesos ,  
el Bureau of Mines decidió realizar una investigación más pro  
funda sobre los tratamientos 1) y 2).

Sobre ambos procesos se desarrolló un importante estudio de--  
terminándose, entre otros aspectos, los requerimientos energéti  
cos, implicaciones respecto al medio ambiente, calidad de la

.../...

alúmina extraída, balance de productos, equipamientos del -- proceso y costes de inversión y operación.

La materia prima, arcilla caolinítica, utilizada como base de partida presenta la siguiente composición química (base seca):

<u>SiO<sub>2</sub></u>	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>L.O.I.</u>	<u>TiO<sub>2</sub></u>	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>MgO</u>	<u>CaO</u>	<u>K<sub>2</sub>O</u>
46,4%	36,5%	13,54%	2,23%	0,86%	0,082%	0,042%	0,095%
<u>Na<sub>2</sub>O</u>	<u>SO<sub>4</sub></u> =	<u>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></u>	<u>F</u>	<u>Otros</u>			
0,046%	0,10%	0,069%	0,022	0,04			

El resultado obtenido, tras las oportunas comparaciones técnicas y económicas, estableció que el proceso con ácido clorhídrico es el método más prometedor para obtener alúmina a partir de material aluminoso no bauxítico.

Como continuación del programa de investigación, el Bureau of Mines acometió el diseño de una planta piloto capaz de producir 25 toneladas de alúmina diarias, basada mediante el proceso con ácido clorhídrico-gas, y en la que participaron compañías privadas. Su objetivo principal era poder determinar la viabilidad industrial del proyecto.

.../...

Una referencia importante en el diseño de la planta llevada a cabo fué la especificación para impurezas máximas permisibles en la alúmina producida, establecida como sigue:

<u>SiO<sub>2</sub></u>	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>Na<sub>2</sub>O</u>	<u>CaO</u>	<u>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>
0,015% max.	0,015% max.	0,40% máx.	0,04% máx.	0,01% máx.
<u>K<sub>2</sub>O</u>	<u>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></u>	<u>NiO</u>	<u>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>MnO</u>
0,005% máx.	0,001% máx.	0,005% máx.	0,02% máx.	0,002% máx.
<u>MgO</u>	<u>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>ZnO</u>	<u>CuO</u>	<u>U<sub>2</sub>O<sub>5</sub></u>
0,02% máx.	0,002% máx.	0,02% máx.	0,002% máx.	0,005% máx.
<u>Cloruro residual</u>				
0,1% máx.				

El proceso se inicia calcinando la arcilla para conseguir la solubilidad de la alúmina en el ácido clorhídrico. La calcinación elimina asimismo el agua libre y combinada y destruye -- cualquier materia orgánica existente en las arcillas.

La arcilla calcinada junto con ClH caliente bajo presión atmosférica, dá lugar a un licor rico en cloruro de aluminio. El licor reposa y filtra y el lodo residual lavado se va recogiendo en depósitos. El hierro disuelto se va eliminando mediante extracción con disolventes y conversión térmica y reac

.../...

ciona con la arcilla calcinada formando cloruro de aluminio y óxido de hierro, el cual se envía a la escombrera. El licor ya libre de hierro, se concentra por evaporación, cristalizando entonces la alúmina como cloruro de aluminio hexahidratado mediante el gas ClH. Los cristales son separados mecánicamente del licor y se descomponen térmicamente para obtener la alúmina.

- c) Proceso Earth Sciences para tratamiento de alunitas.- La alunita una vez molida y reducida a un tamaño inferior a 1/8" es sometida a tostación con el fin de eliminar el agua existente, tanto libre como combinada. Sobre el producto calcinado se realiza una tostación reductora en la que se elimina la mayoría del azufre. Este azufre se dirige a una planta de  $SO_4H_2$ .

El producto reducido se tuesta de nuevo con el objeto de oxidar el hierro y otros sulfuros. Posteriormente es molido y disuelto en agua.

El sulfato de potasio, fácilmente soluble, es separado por disolución en caliente y se emplea para la fabricación de fertilizantes.

.../...

El material exento de sulfato y compuesto principalmente por sílice y alúmina pasa a través de una serie de tanques donde se somete a digestión con hidróxido sódico, según la técnica del proceso Bayer.

Tras la digestión, se separa por un lado un residuo silicioso. El material rico en aluminio se hace reaccionar con un producto de desilicificación, continuando su tratamiento según el esquema Bayer.

Una vez precipitado el hidrato de alúmina se obtiene  $Al_2O_3$  mediante su calcinación.

Este proceso cuenta con la ventaja de que la sílice en las alunitas se presentan como cuarzo, siendo por tanto de mucho menor reactividad que la existente en las bauxitas. Sin embargo la recuperación de alúmina tiene el gran inconveniente del potasio residual que en ella puede provocar problemas en el electrolito a la hora de reducir la alúmina.

Este proceso ha sido contrastado con éxito en una planta piloto en Golden (Colorado) con alunitas procedentes de Cedar (Utah). El proyecto de una planta industrial parece tener bue

.../...

nas perspectivas.

En la URSS existen dos plantas comerciales de tratamiento de alunitas en las que interviene el KOH con una tecnología bastante aproximada a la técnica Earth Sciences en las que se obtienen fertilizantes como subproductos, además de pentóxido de vanadio, galio y ácido sulfúrico.

En Méjico, y tras experiencias positivas en planta piloto, se va a acometer una planta de tratamiento de alunitas siguiendo un esquema que modifica en parte la tecnología de tratamiento desarrollada en la URSS. Está también prevista la fabricación de fertilizantes.

- d) Proceso pirogénico para tratamiento de leucitas.- A partir de leucita explotada en la zona eruptiva de Laziale, Italia, se han realizado experiencias a nivel de planta piloto, mediante tratamiento alcalino ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) por vía seca en horno vertical.

Las fases de la operación son: enriquecimiento del mineral, preparación de la carga, aglomeración, lixiviación, desilicificación, carbonatación y cristalización.

.../...

El mineral tratado, leucita, que responde a la fórmula química  $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$  presenta la siguiente composición química porcentual:

$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$
54,18	0,18	22,11	0,86	1,26	0,56	0,25	0,15

Valorándose la obtención de subproductos que se registra en el proceso, concretamente  $\text{K}_2\text{O}$  y cemento, pueden albergarse expectativas de rentabilidad en volúmenes de tratamiento de mineral más elevados.

- e) Proceso Grzymek. - Este proceso se ha desarrollado a escala industrial en Polonia, en una planta capaz para producir 10.000 t/año de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y 375.000 t/año de cemento Portland 350.

Contempla el tratamiento de materiales aluminosos naturales o artificiales, tales como pizarras, margas, arcillas, esquistos, caolines, residuos de centrales termoeléctricas, etc., con la condición de que presenten como mínimo un 30% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y menos del 55% de  $\text{SiO}_2$ . También admite bauxitas con más de un 20% de sílice que son rechazadas para el proceso Bayer.

.../...

Consiste en la calcinación de los materiales aluminosos con caliza al objeto de obtener materiales sinterizados autodesintegrantes.

La alúmina obtenida por este método se presta muy bien a la obtención, mediante electrolísis, de un aluminio cuyas impurezas no superan los siguientes porcentajes:

$\text{Na}_2\text{O}$ .....	0,100%
$\text{SiO}_2$ .....	0,020%
$\text{TiO}_2$ .....	0,004%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	0,008%

La economía del método admite incluso comparación con la del proceso Bayer y se deriva aparte de los productos obtenidos de la relativa sencillez de las instalaciones.

f) Proceso Toth. - En 1967 fue desarrollado un proceso continuo para la obtención final de aluminio, cuyo artífice fué el investigador húngaro Carlo Toth.

El proceso, que fué estudiado por la Applied Aluminium Research Company, consiste en el tratamiento con cloruro, de arci-

.../...

llas o bauxitas, no aptas para el método Bayer, previamente -- calcinadas. El cloruro de aluminio obtenido es purificado mediante condensación controlada y se reduce posteriormente con manganeso metal.

El hierro se separa en forma de cloruro férrico o ferroaluminato. A su vez el manganeso se recupera mediante la oxidación - del cloruro de manganeso y posterior reducción del óxido a metal mediante adicción de aluminio.

Entre las ventajas que se citan para este procedimiento, se -- significa una inversión de capital inferior por tonelada de - aluminio/año a la que corresponde a la total de las dos con-- convencionales sucesivas, Bayer y Heroult-Hall.

También se afirma un consumo de energía eléctrica diez veces menor que en la etapa de electrolísis Heroult-Hall.

Como subproducto del proceso se obtiene tetracloruro de tita- nio.

6.- PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCION  
DEL ALUMINIO METAL.

La producción de aluminio metal sigue realizándose mediante el sistema de electrolisis, que Heroult y Hall patentaron simultáneamente en 1884. Si bien han sido investigadas otras posibles alternativas, no existe en la actualidad ningún proceso implantado industrialmente distinto al electrolítico.

La reducción de un compuesto intermedio, generalmente alúmina, hasta aluminio metal, constituye la etapa más delicada y más costosa, por lo que a energía consumida se refiere. Es, además, una etapa determinante por la imposición de requerimientos al producto intermedio de aluminio que se ha de utilizar como materia prima.

### 6.1. Proceso electrolítico Heroult-Hall.-

Consiste en la descomposición de la alúmina fundida y disuelta en un baño de criolita fundida, fluoruro doble de sodio y aluminio, mediante el paso de corriente eléctrica entre un electrodo de carbón, introducido en el baño (ánodo) y la cuba (cátodo). La operación tiene lugar en cubas electrolíticas que son cámaras de acero, revestidas de carbón aprisionado, en el que se introducen las barras colectoras de hierro.

Existen dos tipos fundamentales de cubas; las denominadas "prebaked" que son cubas precalentadas, en donde el coque de petróleo se mezcla con brea y se prensa según una veintena de años paralelepípedicos y el tipo Sodebery de electrodo continuo de autococción, del que se han industrializado dos variantes.

Si bien, la técnica electrolítica en sí, sigue los principios expuestos hace más de noventa años, se han conseguido importantes logros en el consumo de energía eléctrica, habiendo pasado desde 100.000 KW/tonelada de Al en 1889 a 13.000 KW/tonelada de Al en 1979.

La técnica actual, no obstante, impone a la alúmina utilizada

.../...

una serie de características particulares en lo que concierne a su granulometría, su pureza, su velocidad de disolución en el baño y su capacidad de absorción de humos, que condicionan el tratamiento de la mena original de aluminio para la extracción de alúmina.

El aluminio fabricado por electrólisis suele contener alguna impureza procedente de la alúmina utilizada y de los electrodos empleados.

El metal obtenido presenta normalmente un análisis porcentual aproximadamente así:

<u>Al</u>	<u>Fe</u>	<u>Si</u>	<u>Ga</u>	<u>Ti</u>	<u>Cu</u>	<u>Mn</u>
99,4-99,8	0,22	0,07	0,02	0,01	0,006	0,005
<u>V</u>	<u>Mg</u>	<u>Na</u>				
0,003	0,003	Trazas				

En casos extremos, partiendo de una alúmina muy pura y de un coque de petróleo de gran calidad, puede obtenerse aluminio metal con una ley de hasta el 99,90%.

## 6.2. Proceso ALCAR de reducción carbotérmica.-

Varias firmas productoras de aluminio han intentado reducir directamente la alúmina por carbono en el horno de arco. La tentativa que mejores resultados ha obtenido ha sido la técnica denominada ALCAR patrocinada por Pechiney, desarrollada en un horno especial por volatilización, a las temperaturas tan elevadas -- que se alcanzan, incluso más de 2.000 °C. Más de 1000 toneladas de aluminio de gran calidad se han producido en un horno piloto de 5.000 KW. Esta alternativa ha constituido hasta el momento un éxito, desde el punto de vista técnico, pero es muy prematuro aún realizar un pronóstico sobre este procedimiento y establecer su competitividad con el proceso electrolítico.

6.3. Procesamiento ALCAN, del monocloruro de aluminio.-

La sociedad ALCAN ha patentado un procedimiento original basado en la disociación reversible del monocloruro de aluminio.



A una temperatura baja, la reacción discurre hacia la derecha, - ocurriendo al revés cuando la temperatura es elevada. Se parte de una bauxita que ha sido reducida en un horno de arco a una - aleación (Al, Fe, Si, Ti) rica en aluminio. Esta aleación se po - ne en contacto con  $\text{Cl}_3\text{Al}$  a alta temperatura, produciéndose en-- tonces la extracción de aluminio por formación del monocloruro. Al bajar la temperatura del gas que sale del reactor, cambia el sentido de la reacción y se recoge aluminio líquido, siendo el  $\text{Cl}_3 \text{ Al}$  reciclado para el ataque de la aleación.

Este proceso, que tiene el inconveniente de consumir energía re - duciendo óxidos de hierro, silicio y titanio, se tropieza con - los problemas que origina en los materiales el empleo de cloro gaseoso a alta temperatura.

A pesar de su desarrollo en planta piloto, no se ha decidido --

.../...

la implantación del proceso a mayores escalas.

#### 6.4. Proceso AZAL, del nitruro de aluminio.-

Este procedimiento fue creado por la firma Pechiney y comprende tres etapas diferentes:

- a) Producción de N Al en un horno de coque, mediante reducción carbotérmica de alúmina en presencia de un exceso de nitrógeno entre 1.700 y 1.800 °C.
- b) Purificación del nitruro en un horno de descarbonatación.
- c) Disociación del nitruro, bajo vacío, a 1.700 °C y condensación del vapor de aluminio así producido.

Las distintas etapas han sido ensayadas con éxito a una escala del orden de 1.000 t/año.

El aluminio producido fue realmente muy puro, superior al — 99,95%. No obstante, las circunstancias de mercado actuales no permiten presentar este proceso de forma económicamente interesante.

#### 6.5. Proceso ALCOA de Electrólisis del Cloruro.-

La sociedad ALCOA, ha reconsiderado el antiguo procedimiento -- Sainte-Claire Deville, modificando ligeramente el baño de cloruro y utilizando las modernas técnicas como las celdas electrolíticas multipolares, admitiendo el apilamiento de electrodos horizontales que sirven de cátodo por su cara superior, donde el -- aluminio desemboca y de ánodo por su cara inferior. Se obtiene, de esta forma, una ganancia neta de tensión con respecto a las celdas Heroult-Hall.

El desarrollo de este proceso parece llevarse a cabo de forma -- satisfactoria. A este respecto, existe en funcionamiento una -- planta piloto de 30.000 toneladas/año.

El cloruro utilizado es obtenido actualmente por carbocloruración -- de la alúmina, aunque también puede producirse de forma di -- recta por carbocloruración selectiva de caolines o arcillas de alto grado de pureza.

Dada la complejidad que entraña el tratamiento de cloruros, el interés económico de este proceso es, en el momento actual, absolutamente incierto.

.../...

7.- VIABILIDAD DE IMPLANTACION INDUS-  
TRIAL

A continuación, se analizarán todos aquellos aspectos que son determinantes a la hora de afrontar la decisión de desarrollar industrialmente un proceso tecnológico, en base a unas reservas de mineral, ya sean propias o ajenas, y en función del tipo de mena - objeto de aprovechamiento. La etapa que fundamentalmente se contempla es, obviamente, la producción de alúmina ya que la obtención de aluminio metal a partir de ésta no comprende auténticas alternativas. No obstante es necesario indicar que el consumo y el precio de la energía eléctrica son factores absolutamente determinantes en esta etapa final que supone la producción mediante electrolisis de aluminio metal.

La base de referencia necesaria no puede ser otra que la técnica Bayer para obtención de alúmina habida cuenta del profundo conocimiento que se tiene de este proceso implantado industrialmente a nivel mundial.

### 7.1. Aspectos técnicos.-

Como ya se afirmara en el prólogo del presente estudio, el proceso Bayer perfeccionado a través de su dilatada experiencia, constituye aún un desproporcionado reto para los distintos procedimientos alternativos que se orientan a producir alúmina a partir de minerales de aluminio no bauxíticos.

Es ciertamente improbable que durante los años 80 se implanten industrialmente técnicas alternativas al esquema Bayer. De cualquier forma, se resúmen a continuación el estado de desarrollo en que se encuentran los procedimientos principales para el tratamiento de minerales de aluminio distintos a la bauxita. Se han omitido no obstante, aquellos procesos cuya viabilidad industrial sólo es posible a nivel de países con unas circunstancias económicas y técnicas absolutamente particulares.

a) Proceso H<sup>+</sup> Pechiney. - Apto especialmente para esquistos hulle ros y arcillas caoliníticas.

Experimentado en planta piloto de 20 t/día de capacidad.

Puede constituir una interesante técnica para obtener alúmina

.../...

de residuos carbonosos con alto porcentaje de  $Al_2O_3$ , pues el carbón contenido suministra una importante aportación de — energía en la etapa de calcinación.

- b) Procesos para el tratamiento de alunitas.- Tanto en Estados Unidos como en México, han sido contrastados en planta piloto, mientras en la URSS existen dos plantas industriales con una producción conjunta superior a las 650.000 toneladas/año.

Entre los inconvenientes de este proceso, se puede destacar el elevado consumo energético. Existen dos versiones del proceso, una que obtiene  $SO_4 H_2$  como coproducto a base de mayores requerimientos de energía eléctrica y combustible y otra que produce sílice, más sencilla y eficaz, pero que requiere mayor cantidad de sosa cáustica.

Ambas variantes producen sulfato potásico que es aprovechado por la industria de fertilizantes.

- c) Proceso del ClH. U.S. Bureau of Mines.- Apto especialmente para arcillas caoliníticas. Inmediata ejecución de una planta piloto apta para producción de 25 toneladas diarias de  $Al_2O_3$ .

.../...

El procedimiento tiene unas expectativas muy interesantes da da su proyección internacional al ser muchos los países que cuentan con voluminosos recursos de la materia prima objeto de beneficio. Colaboran con el U.S. Bureau of Mines en este proyecto diversas empresas privadas.

- d) Proceso "Sinter" con caliza-sosa.- Apto especialmente para -sienitas nefelínicas (nefelina). Desarrollado industrialmente en la URSS, es en la actualidad objeto de estudio y perfeccionamiento para mineral mexicano. Ello, no obstante, pue de constituir una experiencia de aplicación única fuera de -la URSS por ser México un país con importantes recursos energéticos, demandar una considerable cantidad de alúmina y registrar un gran déficit en la producción de cemento, cuya materia prima es subproducto de este proceso.

Su adaptación industrial a un país europeo, resulta claramente prohibitiva.

- e) Proceso Alcoa.- Se trata como ya se explicó anteriormente de un proceso directo de obtención de aluminio metal, basado en la electrólisis del cloruro de aluminio. Este cloruro puede ser obtenido tanto a partir de alúmina como por cloruración

.../...

de caolines o arcillas de cierta calidad.

No obstante, hasta el momento actual no ha sido posible garantizar la rentabilidad del proceso en la planta piloto de 30.000 toneladas/año de capacidad, donde es objeto de experimentación.

## 7.2. Aspectos económicos.-

Aunque por razones económicas locales, se registran procedimientos industriales distintos al proceso Bayer, como puede ser la obtención de alúmina a partir de nefelinas desarrollada en la URSS; la técnica Bayer y sus variantes, adaptados en función de la composición de las bauxitas utilizadas como materia prima, son en la actualidad los únicos procedimientos rentables y a juicio de sus partidarios, seguirán ostentando su primacía, al menos a medio plazo, por los siguientes motivos:

- a) Las reservas actuales de bauxita son muy considerables.
- b) Se siguen registrando descubrimientos de yacimientos de bauxita a pesar de la intencionada reducción de programas en este sentido.
- c) Su tecnología se ha logrado perfeccionar en un grado considerable y es aún susceptible de mejora.
- d) La tendencia de erigir plantas gigantes de 3 millones o más toneladas ha conseguido importantes economías de escala, especialmente en lo que a gastos generales se refiere.

.../...

En oposición a estas ideas, se afirma cada vez con mayor insistencia, la necesidad de recurrir a minerales no bauxíticos dados los incrementos de precio que vienen registrando la bauxita y - su, cada vez más costoso, transporte.

Aunque como ya se ha explicado, la práctica totalidad de plantas de alúmina que existen en el mundo, utilizan básicamente idéntica tecnología y las diferencias a la hora de obtener aluminio - metal no son tampoco apreciables desde el punto de vista económico, existen no obstante, diferencias sensibles en los gastos de inversión por tonelada de aluminio obtenida, atribuibles a - factores como escala de producción, localización de la planta, - infraestructura técnica del emplazamiento, accesos, etc... y -- dentro de unos márgenes más estrechos de la propia composición y labores de extracción de la bauxita.

Se expresan a continuación los costes de inversión para la producción de aluminio primario. Dentro de los mismos, se incluyen todos los gastos de inversión, incluyendo el capital circulante y un porcentaje normal de gastos imprevistos. Se excluyen los - gastos que particularmente pueda suponer la dotación de una infraestructura técnica para el correcto asentamiento de la planta industrial.

.../...

Costes de inversión (Dólares USA 1980/toneladas de aluminio)

	País desarrollado	País en vías de desarrollo.
- Minería	400 - 450	450 - 500
- Obtención de alúmina	1.600 - 2.500	2.000 - 3.100
- Producción de aluminio metal	3.900 - 4.800	4.700 - 5.800
TOTAL	5.900 - 7.750	7.150 - 9.400

En lo que al proceso de producción se refiere, se detalla a continuación identificando en las etapas de actividad industrial -- los gastos específicamente atribuibles a energía, la estructura de costes correspondientes:

Costes de producción (Dólares USA 1980/Toneladas de aluminio)

	País desarrollado	País en vías de desarrollo
<u>Minería</u>		
- Coste principal (1)	80 - 90	90 -100
- Otros	40 - 50	40 - 50
	120 -140	130 -150

.../...

	<u>País desarrollado</u>	<u>País en vías de desarrollo</u>
<u>Obtención de alúmina</u>		
- Coste principal	320-500	400-620
- Energía	50- 60	50- 60
- Otros	<u>15- 20</u>	<u>15- 20</u>
	385-580	465-700
 <u>Producción de aluminio metal</u>		
- Coste principal	780-960	940-1160
- Energía	250-700	250-700
- Otros	<u>100</u>	<u>100</u>
	1.130-1.760	1.290-1.860
 <u>Flete internacional</u>		
	<u>10-40</u>	<u>10-40</u>
TOTAL	1.645-2.620	1.895-2.950

(1) Comprende todos los gastos inherentes a la actividad, junto aquellos -- otros que no varían directamente con la producción. No están incluidos los Royalties ni beneficios extraordinarios.

Tras la crisis energética mundial, el consumo desde este punto

.../...

de vista, de los distintos procedimientos para obtener alúmina se ha convertido en un aspecto fundamental.

Se expresan seguidamente, los consumos energéticos totales, registrados según las principales alternativas técnicas, cifradas en térmias por tonelada de alúmina obtenida.

<u>Materia prima mineral</u>	<u>Procedimiento</u>	<u>Consumo</u>
Bauxita	Bayer	3000- 4000(1)
Esquistos o arcillas	H <sup>+</sup> Pechiney	6500- 9000(2)
Caolines o arcillas	Acido Nítrico	11500-12000
Caolines o arcillas	Acido clorhídrico	12000-12500
Caolines o arcillas	Acido sulfuroso	10000-11000
Nefelinaso anortositas	"Sinter" Caliza-Sosa	12000-14000

(1) Si se contabiliza la energía necesaria para la fabricación de la sosa cáustica y de la cal utilizada, el consumo térmico se eleva hasta 4000-5500 térmias/tonelada de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

(2) Las cifras no contemplan el poder calorífico de las materias carbonosas contenidas en los esquistos, que pueden reducir el aporte exterior en -- aproximadamente 400 térmias/tonelada de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

.../...

Como puede advertirse, el único proceso que plantea competitividad desde el punto de vista energético al proceso Bayer, es el procedimiento  $H^+$  Pechiney, habida cuenta además que la presencia en cantidades importantes de esquistos hulleros y arcillas en regiones industrializadas productoras y consumidoras de aluminio, puede permitir economizar costes de transporte, aspecto siempre adverso, cuando se trata del aprovechamiento de bauxitas.

En la actualidad, el tamaño mínimo en términos de rentabilidad económica de una planta para obtención de alúmina, está comprendido entre 750.000 y 1.000.000 de toneladas/año, lo cual requiere el suministro de 2 a 3 millones de toneladas/año de bauxita. El elevado dimensionamiento de la planta industrial que esto significa, motiva el consorcio o agrupación de varias empresas para la realización de un proyecto de esta naturaleza.

Por otra parte, la puesta en explotación de una mina de bauxita, requiere con frecuencia una extracción mínima de 5 millones de toneladas/año para llegar a amortizar, en un plazo correcto, los gastos de inversión, infraestructura y transporte, inherentes a la extracción del mineral. También se ha de produ

.../...

cir en consecuencia la participación conjunta de dos o más empresas.

Sintetizando diversos pronósticos al respecto, puede cifrarse en un 4-4,5% de media anual, el incremento esperado para la de manda mundial de aluminio hasta el año 1990.

No se prevé para la adecuación a la futura demanda, realizar nuevas plantas de obtención de alúmina, sino ampliar algunas de las ya existentes, si efectivamente se confirma la necesidad de incrementar la producción.

Son diversos los factores que pueden desequilibrar, por otra parte, la adecuación oferta-demanda e impedir la consecución de precios competitivos por parte de los productores de aluminio metal. Entre ellos pueden destacarse la inflación e incremento fuerte de costes para nuevas instalaciones y las posibles decisiones arbitrarias de países asociados a la IBA.

Ante esta situación, la industria no tiene realmente otra opción que la de lograr mayores cotas de productividad y menores consumos energéticos, tanto en la obtención de alúmina como en su transformación a aluminio metal, ya sea por perfeccionamiento

.../...

de los procesos actualmente implantados o por la adopción en un futuro, previsiblemente no inmediato, de nuevas tecnologías que mejoren los resultados actuales. Ello con el concurso de bauxitas o de minerales de aluminio no bauxíticos, indistintamente.

8.- RECURSOS DE MENAS ALUMINOSAS EN ESPAÑA.

Se expresan a continuación los resultados más significativos de los estudios geológicos y campañas de investigación, desarrollados en una serie de zonas favorables de la geografía española, seleccionadas por el IGME con este fin.

8.1. Exploración de menas aluminosas en la reserva Noroeste.-

El estudio comprendió tres fases diferenciadas, como son la investigación del indicio de Portilla de Luna (León), el inventario de menas aluminosas en formaciones del N.O. de la Península, y el reconocimiento de áreas de metamorfismo de contacto.

- Indicio de Portilla de Luna (León)

Sobre un área con una extensión aproximada de 300 Ha. en la que se ha efectuado cartografía a escala 1: 10.000, reconocimiento de la mineralización y análisis de muestras sobre tres principales formaciones geológicas, se han registrado las leyes medias siguientes:

<u>Si O<sub>2</sub></u>	<u>Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub></u>	<u>Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub></u>	<u>Na<sub>2</sub> O</u>	<u>K<sub>2</sub> O</u>	<u>Mg O</u>
38,8-47,6	4 - 7,4	26,7-29,6	0,18-0,33	1,05-2,05	0,3-0,7
<u>Ti O<sub>2</sub></u>	<u>P<sub>2</sub> O<sub>5</sub></u>				
0,35-1,01	0,02-0,1				

El porcentaje de alúmina y el alto contenido en sílice de la -

.../...

bauxita existente, junto con un volúmen ciertamente escaso de la mineralización, hacen absolutamente inexplorable este yacimiento.

- Inventario de menas aluminosas

En el análisis de las 165 muestras tomadas de distintas formaciones situadas en el NO de la península, con el fin de investigar el potencial de  $Al_2O_3$  existente, únicamente se han obtenido resultados de relativo interés en el seno de las arcillas caoliníferas de Puentes de García Rodríguez, si bien la dimensión del yacimiento no parece ser considerable. En la zona existen, además, porcentajes de  $Fe_2O_3$  demasiado elevados.

- Reconocimiento de las áreas de metamorfismo de contacto.

El estudio se enfocó hacia la presumible identificación de andalucita, de potencial interés minero, en seis zonas seleccionadas por su naturaleza geológica y que se relacionan a continuación.

.../...

Zona 1. Area de Boal.

Existen materiales potencialmente aptos como menas aluminosas en el tramo basal de las pizarras de Luarca, a tenor de los resultados ofrecidos por 19 muestras analizadas y que tienen normalmente un porcentaje de  $Al_2O_3$ , igual o superior al 25%. El contenido de  $SiO_2$ , se sitúa próximo al 50% y el de  $Fe_2O_3$  al 10%.

Zona 2. Area de Beariz.

Existen enriquecimientos de andalucitas, donde se detecta hasta un 32,6% de  $Al_2O_3$ . No obstante, el interés de esta área es muy escaso, dado el reducido volúmen de la mineralización.

Zona 3. Area de Mondoñedo.

Sobre 15 muestras tomadas en la localidad de Centeas, 14 ofrecen contenidos de  $Al_2O_3$ , superior al 22%, en una extensión -- que podría ocupar unas 200 Ha., aproximadamente. El  $SiO_2$  contenido oscila entre el 46 y el 51% y el  $Fe_2O_3$  entre el 7 y el 12%.

.../...

Zona 4. Area de Gistral.

La ubicación más favorable se sitúa en las proximidades del -  
pico Penido Vello y abarca alrededor de 25 Ha. La ley media -  
de  $Al_2O_3$ , está por encima del 25%, la sílice es normalmente -  
superior al 50% y el  $Fe_2O_3$  se aproxima al 10%.

Zona 5. Area del Coto de San José.

Al norte del pueblo de Cela y en correspondencia con el tramo  
más inferior de las Pizarras de Luarca, se registran al menos  
30 Ha con la siguiente composición química media:  $Al_2O_3$ : 24%,  
 $SiO_2$ : 50%,  $Fe_2O_3$ : 10%.

Zona 6. Area de Rao

Se han detectado aproximadamente 300 Ha. de andalucita-chiastolita con más del 23% de  $Al_2O_3$ , un 52% de  $SiO_2$  y un 6% de  $Fe_2O_3$ .

Cabe significar aquí, la importante similitud geológica registrada en el conjunto de las zonas analizadas con las aureolas

metamórficas del Complejo Bushveld en Western Transvaal (República de Sudáfrica), donde se registran grandes explotaciones de andalucita, aunque siempre orientada a su participación como materia prima para la fabricación de refractarios aluminosos. No obstante, las reservas surafricanas son muy elevadas y la composición química del mineral beneficiado oscila entre los siguientes porcentajes:  $Al_2O_3$ : 55-60,3;  $SiO_2$ : 37-41,4; --  $Fe_2O_3$ : 0,6-1,4. El elevado contenido de sílice, impide su beneficio para la obtención de  $Al_2O_3$ .

Como puede advertirse, la andalucita reconocida en las áreas de metamorfismo de contacto del NO español, queda muy distante, cualitativa y cuantitativamente, de la experiencia industrial Surafricana, especialmente si se tiene en cuenta que un porcentaje de  $Fe_2O_3$  superior al 3%, hace inviable el aprovechamiento del mineral para la obtención de material refractario.

Puede afirmarse por cuanto antecede que, desde el punto de -- vista de mena de aluminio, las andalucitas del NO de España no constituyen tan siquiera recurso subeconómico.

8.2. Programa sectorial de minerales de aluminio. Subsector 1.

Area 3. La Llacuna (Barcelona-Tarragona).

El área objeto de investigación abarca 37.000 Ha y tiene como centro La Llacuna, zona en el que fueron detectadas mineralizaciones de bauxita que han sido objeto de explotación.

Como resultado de los distintos trabajos realizados, únicamente se significan los afloramientos registrados en la zona de Plana de Casals, sin que las estimaciones de cubicación tengan mayor relieve. Se trata, además, de yacimientos discontinuos y muy dispersos, que supondrían una explotación compleja y costosa.

En definitiva, no se pueden considerar como recursos, los minerales de aluminio registrados en este área de La Llacuna.

8.3. Programa sectorial de minerales de aluminio. Subsector 1.

Area 4. Fuentespalda (Teruel-Tarragona).-

El área objeto de estudio abarca parte de las provincias de Tarragona, Teruel y Castellón, y queda enclavada en el macizo montañoso Puertos de Beceite o Tortosa, con una extensión de — 78.000 Ha.

La constitución geológica de la zona permite establecer dos grupos de bauxita, sobre rocas silíceas o sobre rocas carbonatadas, diferenciadas según su génesis en los tipos cuya composición química se expresa a continuación, como resultado de los análisis realizados sobre sus respectivas muestras.

- Bauxitas pisolíticas (Tipo 1):

<u>Si O<sub>2</sub></u>	<u>Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub></u>	<u>Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub></u>
7,1-43,6%	9,3-46,8%	0,4-25,8%

Su elevado contenido en sílice, cuando el de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, es significativo, unido al escaso volúmen registrado, elimina cualquier probabilidad de explotación de estas bauxitas.

.../...

- Arcillas lateríticas bauxitíferas (tipos 2 y 3)

Su composición química media es:

$\frac{\text{Si O}_2}{\quad}$	$\frac{\text{Al}_2 \text{O}_3}{\quad}$	$\frac{\text{Fe}_2 \text{O}_3}{\quad}$
36,9 %	34,9%	12,6%

Totalizan 80 millones de toneladas del tipo 2 y 22 millones - del tipo 3.

- Arcillas lateríticas bauxitíferas (tipo 4)

$\frac{\text{Si O}_2}{\quad}$	$\frac{\text{Al}_2 \text{O}_3}{\quad}$	$\frac{\text{Fe}_2 \text{O}_3}{\quad}$
59%	22%	6%

Totalizan 3 millones de toneladas

Las arcillas lateríticas tipos 2 y 3, constituyen aproximadamente 110 millones de toneladas de recursos, actualmente Subeconómicos, en tanto en cuanto no se desarrollen industrialmente los procesos alternativos al Bayer, para tratamiento de minerales de aluminio siliciosos y se confirme la viabilidad -- técnica para su aprovechamiento como mena de aluminio.

.../...

8.4. Programa sectorial de aluminio Subsector Centro. Area 1.  
Villacorta-Riaza.-

La superficie de la zona seleccionada es de unos 500 km<sup>2</sup> y cubre parte de la provincia de Segovia y en menor extensión de las de Soria y Guadalajara.

Las mineralizaciones detectadas son de alunita, junto a óxidos de hierro. El área de mayor enriquecimiento y mayor cantidad de mineral es precisamente aquella donde se sitúan las actuales cortas de Negredo y Madriguera, de la firma Echevarría Hermanos, S.A. No obstante, la escasa potencia de los tramos mineralizados y la irregularidad de su distribución espacial ligada a la abundancia de fracturas del zócalo paleozóico, no permiten fundamentar expectativas optimistas. Las leyes, por otra parte, son bastante discretas, pues el porcentaje de Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, no supera normalmente el 30%, mientras que, a su vez, la sílice suele ser superior a un 45%.

Las contadas explotaciones de alunita en el mundo, están basadas en grandes contingentes de mineral, en la oportunidad de energía barata y en el aprovechamiento de una serie de coproductos. En el área Villacorta-Riaza, no se registran ninguno de estos condicionantes.

.../...

8.5. Concentración de silimanitas del Valle del Oro (Lugo).-

En este emplazamiento, se han realizado unas estimaciones cifradas en 4 millones de toneladas de mineral con un contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , próximo al 30%.

Las muestras analizadas presentan en su composición mineralógica un 36% de silimanita. Su composición química es la siguiente:

$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Si O}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
28,2-32,7	58,4-62,8	3,8-5,1

Con este material, han llevado a cabo experiencias distintas -- firmas industriales, logrando mediante flotación y separación magnética, un concentrado cuya composición es de particular interés:

$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Si O}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
58,6-60,7	35,9-37,8	0,8-1,1

A falta de una campaña de investigación más profunda, en este yacimiento pueden conceptuarse como recursos subeconómicos los

.../...

4 millones de toneladas de "todo-uno" que han sido registradas.

Al igual que la andalucita, la silimanita únicamente es explotada para su posterior utilización como materia prima en la producción de refractarios de alto contenido en alúmina. Esta es, por ejemplo, la experiencia surafricana a nivel industrial, donde se beneficia un material más enriquecido en  $Al_2O_3$  que el del Valle del Oro y de menor contenido en Sílice.

No se contempla, por tanto, ninguna perspectiva para considerar la concentración de silimanitas, referida como un recurso desde el punto de vista de aluminio metal.

9.- CONCLUSIONES

Tras lo expuesto en los anteriores capítulos, han quedado patentes dos premisas que permiten establecer la situación de nuestro país, respecto a la producción de aluminio a partir de los diferentes tipos de mena de aluminio existentes.

La primera evidencia de carácter puramente técnico, es la inexistencia a corto y aún a medio plazo, de un procedimiento industrial de posible implantación, como alternativa del proceso Bayer para obtención de alúmina y con independencia del tipo de mena empleada como materia prima. Similar afirmación cabe hacer respecto a la técnica de electrolisis que se utiliza a nivel mundial, en la actualidad, para producir aluminio metal a partir de alúmina.

En segundo lugar, cabe constatar la ausencia de auténticos recursos de menas de aluminio registrada en España hasta el momento presente. Los yacimientos de mineral de aluminio identificados, no pueden, desde ningún punto de vista, ser explotados para la producción de alúmina, aunque con ciertas limitaciones, sirva su producto como materia prima para la industria química de abrasivos, refractarios y cementos.

.../...

Las bauxitas ferruginosas y/o siliciosas, arcillas, caolines y alunitas, entre otros materiales con un porcentaje significativo de  $Al_2 O_3$ , detectadas en nuestro país, deben necesariamente incluirse dentro de la categoría de recursos subeconómicos, -- tanto por su, prácticamente, generalizada escasez de calidad y cantidad, como por la incierta posibilidad de desarrollo industrial de aquellos procesos tecnológicos que contemplan el aprovechamiento de estas menas.

Tampoco puede afirmarse, por otra parte, que en España se hayan agotado todos los programas de investigación que es aconsejable llevar a cabo, por lo que siguiendo el ejemplo de países desarrollados, que como España no tienen reservas de menas de aluminio, las actuaciones objeto de promoción con el fin de evaluar rigurosamente el potencial disponible de recursos capaces de convertir en alúmina, podría basarse en una metodología que comprendiese las siguientes iniciativas:

- 1.- Detección, Investigación y Evaluación de yacimientos de arcillas y caolines con alto contenido en  $Al_2 O_3$  y susceptibles, en principio, de ser tratados por las dos vías tecnológicas de mejores perspectivas de futuro, el proceso  $H^+$  - Pechiney y el procedimiento con ClH del US Bureau Of Mines

.../...

- 2.- Estimación de las inversiones de capital y costes de explotación que supondría el laboreo de un depósito seleccionado a partir de las características especificadas, así como de las sucesivas etapas industriales, hasta la obtención del lingote de aluminio.
- 3.- Evaluación de la cantidad y calidad de la potencial producción de alúmina a partir de estos recursos de aluminio no bauxíticos, en función de la tecnología seleccionada.
- 4.- Análisis económico que permita determinar el precio a que resultaría la alúmina en función de los diferentes supuestos que se establezcan del volumen de producción.
- 5.- Analizar, por último, la relación precio/tonelada de la alúmina, en función de las capacidades de producción posibles, dadas las disponibilidades de mineral bajo distintas hipótesis de precios y amortizaciones, si existiese más de un yacimiento alternativo.