

57  
1270  
-1

**MINISTERIO DE MINERIA**  
**SERVICIO DE MINAS DEL ESTADO**  
**CHILE**

FE DE ERRATAS

Página	Columna	Línea	Dice	Debe decir
4	2	44	conienen	contienen
18	7	8	$\text{Na}_2 \text{SiO}_3$	$\text{Na}_2 \text{SiO}_3$
31	2	5	se la mina	de la mina
34	2	2	en el rómbico-	es el rómbico
35	1	35	no lo ataca	sólo lo ataca
35	1	43	petróleo	petróico
40	1	21	seistiglia	sestiglia

Departamento de Producción

01270

AÑO 1962

## P R E F A C I O

El Servicio de Minas del Estado ofrece la presente publicación sobre el Azufre en cumplimiento de sus propósitos de dar a conocer los recursos minerales de Chile en sus diversos aspectos.

Chile posee grandes reservas de minerales de azufre nativo, pero, a pesar de ello, su explotación no ha alcanzado a constituir una industria de exportación, ni siquiera ha alcanzado los niveles de costos que permitan el máximo consumo interno en las numerosas industrias que lo usan como materia prima.

Como nuestro país se encuentra en pleno desarrollo industrial y el uso del azufre se ha generalizado en tal forma que ha llegado a ser absolutamente necesario para el desarrollo industrial de las naciones, el Servicio de Minas del Estado ha estimado necesario analizar los principales factores que inciden en los costos de producción minero, mineralúrgico y transporte, comparándolos con los de otros países productores de azufre.

Ha facilitado este trabajo la eficaz colaboración prestada por las empresas azufreras, proporcionándonos los datos y antecedentes que les fueron solicitados y por los Ingenieros de Minas que han puesto a nuestra disposición los resultados de su experiencia, adquirida durante muchos años, de investigación en las minas y en los laboratorios.

Deseamos dejar testimonio de nuestro agradecimiento a todos los que han cooperado en una u otra forma a la realización de este trabajo; queremos hacer mención especial de la inestimable y desinteresada cooperación de los Ingenieros señores Benjamín Leiding y Danilo Rojic; el primero por los numerosos informes sobre yacimientos de azufre nacionales, de los cuales es autor, y el segundo por sus informaciones sobre extracción del azufre y muy en especial sobre el proyecto de solución integral de explotación, extracción y transporte de los caliches de las azufreras del Tacora, del cual es autor, y cuyas cifras nos ha sido posible publicar gracias a su autorización.

**MARIN RODRIGUEZ DIEZ**

Ingeniero Asesor.

# INDICE DE MATERIAS

---

	Páginas
PREFACIO .....	1
HISTORIA DEL AZUFRE .....	2
FUENTES PARA LA OBTENCION DEL AZUFRE .....	3
Azufre proveniente de yacimientos mineros .....	3
Yacimientos de azufre nativo .....	3
Yacimientos de compuestos sulfurados .....	5
Azufre recuperado .....	6
RESERVAS DE AZUFRE EN EL MUNDO .....	7
RECURSOS DE AZUFRE EN CHILE .....	8
Reseña histórica .....	8
Localización de los yacimientos .....	9
Génesis de los yacimientos .....	14
Mineralurgia del azufre .....	15
Reservas de azufre en Chile .....	19
PRODUCCION Y COMERCIO .....	21
Producción .....	21
Producción mundial .....	21
Producción de Chile .....	24
Comercio .....	26
Mercado y precios internacionales .....	26
Comercio interno .....	28
NUEVAS INSTALACIONES EN LA INDUSTRIA AZUFRERA .....	31
INCIDENCIAS DE LA MINERIA DEL AZUFRE EN LA ECONOMIA NACIONAL .....	33
Valor de la producción .....	33
Empleo de la mano de obra .....	33
APENDICE .....	34
Propiedades del azufre .....	34
Procedimientos de extracción del azufre .....	35
Usos del azufre .....	40
BIBLIOGRAFIA .....	40

---

## HISTORIA DEL AZUFRE

El azufre es conocido desde varios siglos antes de nuestra era. Los griegos lo llamaban "theion" y los romanos "sulfur" y despertó la atención de los antiguos porque sus diferentes propiedades —color, combustión, medicinales, químicas— permitían su utilización en muy variados campos. Se le menciona en la Biblia y Homero se refiere a él como desinfectante y Dioscorides (médico) preparaba con azufre ungüentos para curar infecciones de la piel (dermatología).

Con anterioridad a los 2.000 años A. C. lo empleaban para blanquear telas y los egipcios, en 1.600 A. C., lo usaban en la obtención de pinturas. Los romanos lo empleaban en la fabricación de bronce para las estatuas y también para preparar materiales inflamables utilizados en la guerra; pero, recién a principios del siglo XII de nuestra era, se le emplea en la fabricación de la pólvora, con lo cual comienza la gran importancia del azufre.

Se tenía ideas confusas sobre el azufre; se hacía resaltar su característica de combustible y se creía que todos los cuerpos combustibles contenían azufre, y durante mucho tiempo se pensó que no era un elemento; fueron Gay-Lussac y Thenard quienes demostraron que el azufre era un elemento.

Desde ese momento, y con el desarrollo de la tecnología química, el azufre ha pasado a ser un elemento esencial en la industria moderna, y los países altamente industrializados están abocados a conseguir su abastecimiento fácil y seguro.

El azufre es un metaloide que se encuentra ampliamente repartido en la naturaleza como recurso natural al estado nativo y en compuestos químicos, formando sulfuros y sulfatos. Además, se le recupera de los gases, humos y desperdicios de numerosas industrias.

Los países que no lo tienen al estado nativo o lo poseen en pequeñas cantidades, orientan sus esfuerzos para extraerlo de los compuestos naturales y recuperarlo como subproducto de otras industrias.

Durante siglos Italia fue el principal productor del mundo y a principios del presente el 95% de la producción mundial provenía de los yacimientos de azufre nativo de Sicilia. Con el descubrimiento de los enormes depósitos de azufre elemental en las costas del Golfo de México, en Luisiana, Texas y México, y el perfeccionamiento del método de explotación, ideado por Herman Frasch en 1903, Estados Unidos aumentó su producción de azufre, la que en 1930 representó el 85% de la producción mundial, mientras que Italia sólo contribuyó con un 11,5%; es decir, entre las dos naciones producían el 96,5% del azufre mundial. Pero otros países también han intensificado su producción y es así como en el año 1960 Estados Unidos representa solamente el 35,7% e Italia baja a 4,6%, en conjunto el 40,3%, que se compara con 96,5% de hace 30 años.

## FUENTES PARA LA OBTENCIÓN DEL AZUFRE

El azufre se obtiene de dos fuentes principales: de la explotación de yacimientos mineros y de la recuperación de gases naturales e industriales.

### A. AZUFRE PROVENIENTE DE YACIMIENTOS MINEROS.

El azufre se encuentra en la naturaleza al estado nativo y combinado con otros elementos, formando un gran número de minerales, principalmente sulfuros y sulfatos.

Profusamente distribuido, su contenido medio en la litósfera, hidrósfera y atmósfera se ha calculado en 0,06%, pero solamente en escasos lugares se encuentra en concentraciones que constituyen yacimientos mineros de valor económico.

#### 1. Yacimientos de azufre nativo.

Al estado nativo, el azufre se encuentra atendiendo a su génesis, en dos clases de yacimientos.

De origen volcánico

De origen sedimentario

#### Yacimientos de origen volcánico

Estos yacimientos están ubicados en las proximidades de los volcanes, en las laderas de ellos y en los mismos cráteres; por consiguiente, es lógico deducir que su génesis está íntimamente ligada a fenómenos eruptivos recientes. Yacimientos de esta clase se encuentran en zonas volcánicas activas o apagadas.

Existen yacimientos de azufre en todo el cordón de volcanes que rodea al Océano Pacífico: en la Cordillera de Los Andes hay azufreras en toda Sud América y en su prolongación a través de México y Estados Unidos; Japón, que es un país muy volcánico, también tiene numerosos yacimientos de azufre de esta naturaleza.

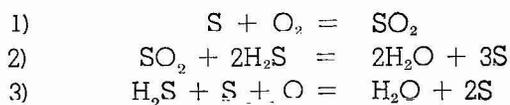
Los depósitos se encuentran en rocas efusivas de todas clases, emanadas de los mismos volcanes

de su ubicación, y los agentes mineralizadores proceden también de ellas; con frecuencia se observa, hoy día, el desprendimiento de gases de hidrógeno sulfurado ( $H_2S$ ) y de anhídrido sulfuroso ( $SO_2$ ) a través de las grietas de los yacimientos.

Durante mucho tiempo se han discutido las reacciones químicas que han dado origen a la deposición del azufre, pero ya se acepta que estos pueden producirse por una o, simultáneamente, varias de las siguientes maneras:

1. Por condensación de vapores de azufre ascendentes que se depositan en los huecos y poros de las rocas que atraviesan. Esto puede suceder a cierta distancia del origen, donde la temperatura reinante permite mantener el azufre al estado gaseoso. El azufre puede depositarse al estado cristalino y amorfo.

2. Los vapores de azufre ascendentes se oxidan a  $SO_2$ , que reacciona con  $H_2S$ , también ascendente, según las siguientes ecuaciones:



Cuando la cantidad de oxígeno es insuficiente para absorber totalmente el hidrógeno sulfurado ascendente, éste escapa a la atmósfera.

Las reacciones 1, 2 y 3 se producen en las fumarolas y solfataras de numerosos volcanes y se percibe el olor a hidrógeno sulfurado que escapa a la superficie.

3. Los vapores sulfurosos que ascienden pueden reaccionar con los componentes de las rocas que atraviesan, depositándose azufre por acción metasomática.

Las características físicas y químicas de las rocas volcánicas que atraviesan los agentes mineralizadores, determinan la calidad de los yacimientos de azufre que se originan. Su forma depende de la posición de las rocas, de los conductos de circulación de los agentes mineralizadores y de los fenómenos volcánicos que han originado el desprendimiento de estos agentes.

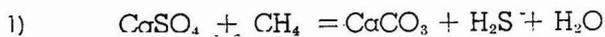
En el capítulo que trata sobre los yacimientos de Chile nos referimos a las diferentes clases que se forman de acuerdo con los factores que intervienen.

La producción mundial de azufre de origen volcánico no alcanza al 5% del total.

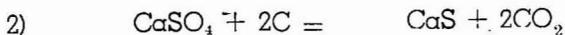
#### Yacimientos de origen sedimentario.

**Génesis.** Los yacimientos sedimentarios de azufre nativo más importantes están asociados con rocas de yeso, anhidrita, calizas y margas, que se han formado en lagunas de agua dulce. Su formación se explica por la oxidación del hidrógeno sulfurado ( $H_2S$ ), el que puede tener su origen en la descomposición de materias orgánicas y en la reducción de los sulfatos de calcio (yeso, anhidrita).

La reducción de los sulfatos puede realizarse por la acción del metano ( $CH_4$ ), que se forma por la putrefacción de sustancias orgánicas, según la reacción siguiente:

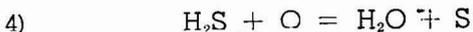


También las bacterias anaerobias reducen los sulfatos según las siguientes reacciones:



El carbono (C) proviene de los protoplasmas de las bacterias.

El hidrógeno sulfurado se oxida y se precipita azufre pulverulento mezclado con carbonato de calcio, formando sedimentos calcáreos con contenidos de azufre, que pueden dar origen a yacimientos de valor económico.



La oxidación del  $H_2S$  puede realizarse por medio del oxígeno que se encuentra en las aguas profundas de los lagos y por las bacterias del azufre.

**Principales tipos de yacimientos.** Yacimientos sedimentarios existen en numerosas partes del mundo, y se pueden agrupar en dos tipos principales:

Yacimientos asociados a domos de sal: Tipo Golfo de México.

Yacimientos intercalados en formaciones sedimentarias comunes: Tipo Sicilia.

Se dan estos nombres porque son los yacimientos más grandes conocidos hasta el presente y a cada uno corresponde una época de predominio en el mercado mundial. En efecto, durante los primeros tiempos de la industria azufrera, puede decirse que Sicilia mantuvo el monopolio de la producción mundial, hasta que se descubrieron los yacimientos de

Texas y Luisiana en las costas norteamericanas del Golfo de México y posteriormente los del Istmo de Tehuantepec en las costas mejicanas del mismo Golfo; estos yacimientos desplazaron a los sicilianos del puesto de honor.

#### Yacimientos sedimentarios tipo Golfo de México.

Existen en Estados Unidos, México, Alemania, Rumania, Rusia e Irán. Los yacimientos más importantes en magnitud y los únicos que se explotan actualmente, son los que se encuentran en las costas del Golfo de México, en los estados de Luisiana y Texas y en el istmo de Tehuantepec; la descripción que se hace a continuación se refiere a ellos y se puede hacer extensiva a los demás porque son semejantes en forma y génesis.

Consisten en acumulaciones de azufre en los casquetes de domos de sal. Estos domos, que se ubican en el Mioceno, son enormes columnas que se han levantado desde grandes profundidades, intruyendo los sedimentos superpuestos. La sección horizontal puede ser circular o elíptica y abarca grandes superficies, de hasta 800 hectáreas cada uno.

Los sedimentos superpuestos, que forman el casquete, tienen la siguiente secuencia: inmediatamente encima de la roca de sal se encuentran estratas de anhidrita ( $CaSO_4$ ) y yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), sobre ellas, calizas ( $CaCO_3$ ) cavernosas y, finalmente, sedimentos de arcilla, cascajo y arenas no consolidadas. El espesor de este complejo sedimentario es muy variable.

El azufre se encuentra en la parte inferior de la caliza cavernosa, en el contacto con anhidrita o con el yeso, y su espesor varía desde 7,50 hasta 90 metros. Sobre el depósito de azufre continúan las calizas estériles que tienen de 2 a 60 metros, encima de las cuales descansan los sedimentos no consolidados.

La profundidad en que se encuentran las estructuras varía desde 150 hasta 600 metros. Sin embargo, en los domos costeros de Luisiana se han registrado profundidades de sólo 20 metros.

Las leyes de un mismo yacimiento pueden variar desde 10% hasta 50% de azufre. No todos los domos contienen azufre y no todos los que contienen son comerciales. Así, de 230 estructuras que se han reconocido con azufre, solamente 21 han resultado de valor económico, es decir, el 9%.

Los yacimientos norteamericanos se encuentran en las costas de Luisiana y Texas, desde la desembocadura del río Misissippi hacia el oeste y dentro de una faja curva, paralela al Golfo, que en sentido

transversal se extiende desde 100 kilómetros al interior de la costa, hasta 12 kilómetros mar adentro. Su hallazgo tuvo lugar durante las exploraciones petrolíferas ejecutadas en esa región, que es una de las de mayor productividad de Estados Unidos; muchos de los depósitos de petróleo están ligados también a domos de sal.

**Yacimientos sedimentarios tipo Sicilia.** Existen en Italia (Sicilia, Bolonia, Calabria, Campania y Toscana), España, Francia, Rusia, Estados Unidos, Ecuador, Venezuela, Perú, Persia, Croacia, Galizia, Alta Silesia.

Como todos los yacimientos tienen génesis semejantes, se describirán solamente los de Sicilia, porque son los más importantes y más estudiados.

Los yacimientos de Sicilia ocupan una gran superficie en el centro de la isla: 130 km. de largo, de este a oeste, por 60 km. de ancho de norte a sur; forman cuencas aisladas de las cuales las más importantes son las de Caltanissetta y Agrigente.

El azufre está asociado a rocas calcáreas, yeso y anhidrita, como en el Golfo de México, con la diferencia que estas capas se encuentran interestratificadas con pizarras y arcillas bituminosas. A esta formación, que está plegada y fallada, se la sitúa en el Mioceno Superior.

El azufre se presenta en grandes masas rellenas de cavernas en las calizas y también como mantos lenticulares de azufre puro, de 2 a 3 centímetros de espesor. Forman yacimientos lenticulares de muy diversos tamaños (120 a 200 m. de diámetro) y de espesores también variables (2 a 20 m.).

La ley que se explota fluctúa entre 12 y 50%, con un promedio de 25%; aisladamente existen leyes hasta 70%. Un contenido inferior a 8% no se considera comercial.

Se acepta la misma génesis descrita al principio del presente capítulo, es decir, el azufre se ha formado por reducción del yeso y de la anhidrita durante la sedimentación y por medio de los procesos ya indicados.

## 2. Yacimientos de compuestos sulfurados.

Los minerales que constituyen yacimientos de valor económico como productores de azufre, son sulfuros casi en su totalidad, con excepción de muy pequeñas cantidades de sulfatos que se explotan en Noruega, España y Portugal.

Los principales sulfuros son: pirita ( $\text{FeS}_2$ ), marcasita ( $\text{FeS}_2$ ) y pirrotita ( $\text{Fe}_9\text{S}_7$ ); normalmente estos minerales integran la ganga en yacimientos de oro, cobre, plomo, zinc, níquel, etc., o bien, constituyen yacimientos de solamente pirritas.

La pirita y marcasita se encuentran en toda clase de roca, de cualquier época geológica; se considera que se han formado a moderadas profundidades y a mediana temperatura. En cambio la pirrotita se genera a mayores profundidades y a temperatura relativamente alta, se encuentra asociada de preferencia a rocas básicas: gabro, norita y peridotita.

Las pirritas que se encuentran como gangas en yacimientos metálicos se recuperan como subproductos por flotación diferencial en forma de concentrados.

El azufre se extrae de los minerales metálicos sulfurados (calcopirita, blenda, galena, etc.) al estado de  $\text{SO}_2$ , mediante una tuesta previa al tratamiento metalúrgico de los metales bases. El  $\text{SO}_2$  se somete a un proceso que lo transforma inmediatamente en ácido sulfúrico, o sea, no se produce azufre elemental.

De la misma manera, la explotación de las pirritas tiene por objeto principal la fabricación de ácido sulfúrico y otros productos.

Los yacimientos de pirritas más grandes del mundo se encuentran en España, en la provincia de Huelva, y en Portugal, en la región de Alentejo.

Los principales sulfuros, que se utilizan como fuentes de azufre, y sus contenidos son los siguientes:

Mineral	Composición	Azufre %
Pirita	$\text{FeS}_2$	53,4
Marcasita	$\text{FeS}_2$	53,4
Molibdenita	$\text{MoS}_2$	40,0
Pirrotita	$\text{Fe}_9\text{S}_7$	38,4
Millerita	$\text{NiS}$	35,3
Calcopirita	$\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{S}_4$	35,0
Blenda (Esfalerita)	$\text{ZnS}$	33,0

La ley media de los minerales sulfurados explotados durante el año 1960 fue aproximadamente de 42% de azufre.

## B. AZUFRE RECUPERADO

El azufre se recupera de gases naturales que se desprenden generalmente en regiones volcánicas, conocidas con el nombre de solfataras; se encuentra al estado de anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ) e hidrógeno sulfurado ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Mucho mayor importancia tiene la recuperación de gases industriales, es decir, de gases que se producen en diversas industrias y que se consideran como desperdicios. Se puede citar gases de las siguientes procedencias:

- Refinerías de petróleo
- Fundiciones de minerales
- Destilaciones de carbones
- Combustión de carbón y petróleo en las centrales de energía, etc.
- Varias otras industrias.

El azufre se presenta de preferencia al estado de anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ) y de hidrógeno sulfurado ( $\text{H}_2\text{S}$ ). La mayor producción se obtiene de las fundiciones de minerales y de refinerías de petróleo y su recuperación representa, muchas veces, una importante entrada adicional.

En muchos casos las cantidades de  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  son muy pequeños y su recuperación no es remunerativa, como en la combustión de carbón y petróleo en calderas y otras industrias menores, pero como disposiciones sanitarias obligan la purificación de la atmósfera, en tales casos la recuperación de cualquier cantidad de azufre abarata los costos de purificación.

Se ha desarrollado varios procedimientos para recuperar azufre de los gases naturales e industriales, unos por vía seca, otros por vía húmeda. Se puede recuperar el azufre elemental y al estado de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{SO}_2$ , según la conveniencia y aplicación industrial que se desea dar al producto recuperado; por ejemplo, la recuperación del  $\text{SO}_2$  de las fundiciones pasa directamente a la fabricación de ácido sulfúrico sin necesidad de llegar al azufre elemental.

Durante los últimos años se ha despertado gran interés en los países industrialmente desarrollados y en proceso de desarrollo por instalar plantas con el objeto de recuperar este elemento de los gases de ambas procedencias, naturales e industriales.



## RESERVAS DE AZUFRE EN EL MUNDO

El azufre se encuentra repartido en casi todo el mundo y son muy pocos los países que no lo poseen; pero no existe inventario, medianamente aproximado, de las reservas mundiales. Las publicaciones técnicas sólo mencionan cifras aproximadas de algunas regiones y se limitan a decir que las reservas mundiales son tan amplias que con el consumo actual está asegurado el abastecimiento durante muchos años y pueden responder a cualquier aumento de demanda.

La confianza que se tiene en las reservas de azufre puede ser el motivo de por qué no se ha puesto mayor interés en determinarlas con exactitud.

Como datos ilustrativos se consignan las siguientes cifras aproximadas, para cada una de las formas en que se encuentra el azufre, y los países que se supone poseen las mayores reservas.

<b>Azufre sedimentario en domos de sal:</b>	<b>Millones de toneladas</b>
Estados Unidos (Texas y Luisiana)	100 de azufre
México (Istmo Tehuantepec)	50 de azufre
<b>Azufre sedimentario normal:</b>	
Italia	80 de azufre
<b>Azufre volcánico:</b>	
Chile	50 de azufre
Japón	30 de azufre
<b>Pirritas (FeS<sub>2</sub> y Fe<sub>2</sub>S<sub>7</sub>)</b>	
España y Portugal, en pirritas de 40% S	200 de azufre
India	154 de azufre
Noruega	100 min. de pirrotita
Marruecos	25 min. de pirrita
Turquía	10 min. de pirrita

Existen además 11 países que explotan yacimientos de azufre nativo y otros 26 que explotan yacimientos sulfurados, como fuentes de producción de azufre, sobre cuyas reservas no se tiene cifras o sólo se tiene datos muy vagos. Japón es el principal país productor de azufre de yacimientos de pirritas, lo que hace suponer que tiene reservas apreciables, sin embargo, no se ha dado a conocer cifras.

Además de las reservas de azufre contenido en yacimientos mineros, debe considerarse la recuperación de azufre de los gases y otras fuentes.

Estas reservas son inagotables, ya que aumentan conjuntamente con el progreso industrial, lo que da una tranquilidad para el abastecimiento futuro de este elemento.

## RECURSOS DE AZUFRE EN CHILE

### A. RESEÑA HISTORICA

En la literatura antigua hay constancia de que los primeros descubrimientos de azufre nativo en territorio chileno fueron hechos durante la primera mitad del siglo XVII y más o menos al mismo tiempo en la región de Tacora, entonces perteneciente al Virreinato del Perú, y en el Cerro del Azufre o Volcán Copiapó, en la Capitanía General de Chile.

Todos los yacimientos tienen azufre de alta ley, de utilización directa, y eso fue lo primero que se explotó.

Los productos de las primeras explotaciones fueron destinados al Perú, para la fabricación de pólvora, y es de suponer que provenían de las azufreras del Tacora por estar más cerca del consumo que las de Copiapó, pero no se sabe la fecha exacta de la iniciación. Lo que se sabe a ciencia cierta es que en el año 1769 el Mariscal de Campo Francisco Cisternas Villalobos emprendió las primeras exploraciones en el Cerro del Azufre. El azufre se bajaba en mulas hasta el puerto de Caldera para su embarque al Perú.

Con la apertura de las oficinas salitreras y la explotación de numerosas minas, principalmente de plata, en Chile y Perú, se amplió considerablemente el mercado del azufre para la fabricación de pólvora y elaboración del yodo, lo que motivó la explotación de las azufreras de Tarapacá y Antofagasta. Así se abrieron las de la región de Ollagüe, que constituye otro distrito importante.

Se desarrollan tres distritos mineros de azufre: Tacora - Chupiquiña y otros, en la provincia de Tarapacá; Ollagüe y otros, en la provincia de Antofagasta y Cerro del Azufre, La Coipa y Codochedo, en

la provincia de Atacama. Se forma así un cordón casi continuo de azufreras, comprendido aproximadamente entre los paralelos 18° y 27° Sur, o sea, en una extensión aproximada de 1.000 kilómetros.

Como el consumo mayor estaba en el Norte, en Antofagasta, Tarapacá y Bolivia, las azufreras de Atacama llevaron una vida lánguida, sufriendo muchas interrupciones, hasta que prácticamente se paralizaron.

Más al sur se descubrieron otras azufreras aisladas, de mucho menor importancia, que han sido explotadas ocasionalmente:

"El Toro", en la provincia de Coquimbo, se explotó desde 1865 hasta 1890 para la fundición de cobre Lambert, donde se usaba como fundente; "Molinana" (Tinguiririca), en la provincia de Colchagua, ha sido trabajada intermitentemente desde 1861 hasta hace pocos años; "Chillán", en la provincia de Ñuble, cuya explotación comenzó a fines del siglo XVIII y que producía de preferencia azufre ventilado para la desinfección de viñas (actualmente está paralizada).

La industria azufrera de Chile ha experimentado numerosas alternativas, pasando por épocas de bonanza y épocas de crisis. A pesar de poseer numerosos yacimientos con leyes muy superiores a las de otros países, no ha logrado consolidarse como una industria de exportación, debido a los altos costos de producción, como consecuencia de su ubicación en alta cordillera y a considerables distancias de los centros consumidores y de los puertos de embarque y, además, a las dificultades encontradas para extraerlo de las rocas que lo contienen.

La producción está destinada prácticamente al consumo interno; no es posible competir en el mercado internacional mientras existan las condiciones

técnicas y económicas que, felizmente, se están modificando favorablemente. En épocas de guerra (1914-1918 y 1940-1945) se exportaron algunas cantidades apreciables; en épocas normales se exportan pequeñas cantidades a los países vecinos, Perú y Bolivia.

## B. LOCALIZACION DE LOS YACIMIENTOS

Los yacimientos de azufre nativo chilenos están ubicados muy cerca de las cimas de la alta Cordillera de Los Andes, en una faja que se extiende, por el norte, desde la frontera con el Perú, latitud  $17^{\circ} 40'$  Sur, con los yacimientos de los volcanes Tacora y Chupiquiña, hasta la latitud  $40^{\circ}$  Sur, con las azufreras Riñinahue, Azufrales y Volcán, en la provincia de Valdivia, o sea, en una longitud de 2.500 kilómetros. En esta faja de azufreras se distingue claramente dos secciones: una, desde el extremo norte hasta Copiapó, y la otra, desde Copiapó hasta la provincia de Valdivia.

En la sección sur se conocen unos 15 distritos azufreros de escasa importancia, que se encuentran muy espaciados, de los cuales solamente tres (El Toro, Tinguiririca y Chillán) han sido explotados en pequeña escala hace muchos años. Nos referimos a distritos azufreros sin individualizar los yacimientos por ser éstos difícil de precisar.

En la sección norte se conocen más de 80 distritos azufreros con un sinnúmero de yacimientos de magnitudes y valores muy diferentes. Aquí se encuentran los depósitos que se explotan en la actualidad. Esta faja se prolonga por territorio peruano,

hasta el yacimiento Carhuarazo cerca del paralelo  $14^{\circ}$  Sur. La faja de yacimientos de azufre que se extiende desde el paralelo  $14^{\circ}$  en Perú hasta el paralelo  $27^{\circ}$  en Chile, constituye la provincia minera más extensa y más alta del mundo; la altura máxima corresponde a la azufrera Aucanquilcha con 6.140 m. sobre el nivel del mar.

Todos los yacimientos están relacionados con la cadena de volcanes que se encuentran en la columna vertebral del macizo andino, en la línea fronteira con Perú, Bolivia y Argentina, y se hallan localizados en los cráteres y en las laderas y por lo general llevan el nombre de los volcanes de su ubicación. Hay yacimientos en territorio chileno, peruano y argentino, todos con las mismas características. Su ubicación es desfavorable, pues, además de las enormes alturas se encuentran a grandes distancias de los centros poblados y de la costa. Solamente dos distritos están cerca de la línea férrea: Tacora-Chupiquiña, del ferrocarril de Arica a La Paz; y Ollagüe, del ferrocarril de Antofagasta a Bolivia.

En el plano N<sup>o</sup> 1 están ubicados con número la mayoría de los yacimientos o distritos cuyos nombres y otros antecedentes se detallan en el cuadro N<sup>o</sup> 1. No se pretende que la nómina sea completa, pues existen muchos más, unos conocidos y otros desconocidos.

Además de yacimientos de azufre nativo, Chile posee en gran cantidad yacimientos metálicos, con predominio de sulfuros de cobre como sustancia útil y sulfuros de hierro como ganga.

También existen yacimientos en que la pirita de hierro es el mineral principal, pero hasta la fecha no se les puede asignar valor comercial, como fuentes directas para la obtención de azufre.

Nombre de la Mina Distrito Minero		Propietario	Departamento	Comuna	Latitud	—	Longitud
<b>PROVINCIA TARAPACA</b>							
1	Tacora-Chupiquiña	Cía. Azufrera Nacional	Arica	General Lagos	17° 42'	—	69° 46'
2	Caracarani	"	"	"	17° 46'	—	69° 36'
3	Chuquiananta	"	"	"	17° 46'	—	69° 32'
4	Lexone	Cía. Azufrera Chile	"	"	17° 49'	—	69° 23'
5	Timivilque	"	"	"	18° 05'	—	69° 24'
6	Colpitas	D. Copaja, J. Cademartori y otros	"	"	"	"	"
7	Jaruma	"	"	"	"	"	"
8	Tuquillane	D. Copaja, Cánepa y Cía.	"	"	"	"	"
9	Larancagua	D. Copaja y Loro	"	Putre	17° 59'	—	69° 23'
10	Inquillani	"	"	"	18° 01'	—	69° 26'
11	Tahapaca	Empresa Azufrera Tahapaca	"	"	18° 07'	—	69° 31'
12	Caporata	"	"	Belén	18° 22'	—	69° 05'
13	Huallatire	J. Trabuco y otros	"	"	18° 24'	—	69° 04'
14	Payachatas	J. Trabuco	"	Putre	"	"	"
15	Aroma	Cía. Nac. Azufrera Aroma	"	"	"	"	"
16	Puchintica	Saavedra, Scheleff y otros	"	Belén	18° 40'	—	69° 01'
17	Arintica	"	"	"	18° 44'	—	69° 06'
18	Purapurane	"	"	"	"	"	"
19	Anocarire	"	"	"	18° 45'	—	69° 15'
20	Chiguana	A. Robles y R. Lorca	"	"	"	"	"
21	Pumire	A. Brazzale	Pisagua	Pisagua	19° 03'	—	69° 02'
22	Uscane	"	"	"	19° 17'	—	68° 57'
23	Callajuayo	"	"	"	"	"	"
24	Islura	"	"	"	19°	—	69°
25	Puchuldisa	"	"	"	"	"	"
26	Lataraña	"	"	"	19° 18'	—	68° 59'
27	Huallane	"	"	"	19° 25'	—	69° 01'
28	Huaina-Potosí	"	Iquique	Pozo Almonte	19° 39'	—	68° 54'
29	Quimsachata	"	"	"	19° 42'	—	68° 51'
30	Cultane	"	"	"	"	"	"
31	Sillajuaya	Cía. Azufrera Sillajuaya	"	"	19° 46'	—	68° 45'
32	Tucuruma	"	"	"	19° 57'	—	68° 50'
33	Cancosa	"	"	"	20° 03'	—	68° 37'
34	Porquesa	"	"	"	20° 06'	—	68° 43'
35	Entrecopas	"	"	"	20° 10'	—	68° 43'
36	Sillilica	"	"	"	20° 15'	—	68° 43'
37	Huantija	"	"	"	19° 51'	—	68° 47'
38	Irrupuntuco	R. O. Packard	"	"	20° 44'	—	68° 35'
39	Ocaña	Soc. Ind. Azufrera Ltda.	"	"	20° 45'	—	68° 37'
40	Victoria	José López	"	"	"	"	"
41	San Antonio	José López	"	"	"	"	"
<b>PROVINCIA ANTOFAGASTA</b>							
42	Chutinza	Otmar Petrinovic	Loa	Calama	20° 54'	—	68° 32'
42	Puquios	Luis Borlando A	"	"	20° 54'	—	68° 32'
44	Olca	Schelle Poblete Ltda.	"	"	20° 57'	—	68° 31'
45	Flecha de Olca	Carlos Díaz Ossa	"	"	20° 57'	—	68° 31'
46	Flor de Olca	Schelle Poblete Ltda.	"	"	20° 57'	—	68° 37'
47	Cosca	Soc. Az. Flecha de Olca	"	"	21° 01'	—	68° 30'
48	Aucanquilcha	Soc. Az. Aucanquilcha	"	"	21° 14'	—	68° 34'
49	Polan	Hugo Stein	"	"	21° 15'	—	68° 34'
50	Chaguire	Soc. Az. Aucanquilcha	"	"	21° 15'	—	68° 34'
51	Chilena	Soc. Az. Borlando	"	"	21° 18'	—	68° 12'
52	Cecilia	Siam Carrasco S. A.	"	"	21° 18'	—	68° 12'
53	Ollagüe	Soc. Az. Borlando	"	"	21° 18'	—	68° 12'
54	Santa Rosa	Soc. Az. Aucanquilcha	"	"	21° 18'	—	68° 12'
55	Polapí	Yutronic y Cía.	"	"	21° 43'	—	68° 25'
56	Ascotán	Suc. Villada	"	"	21° 43'	—	68° 14'

# AZUFRERAS DE CHILE

Altura m. s. n. m.	Ley % S	Cubicación Miles t	Actividad	Distancias
5.000	50	2.000	Ex	20 km. estación Villa Industrial
			Pa	15 " " " "
	70		Pa	220 " " Arica
5.070	50		Pa	36 " " S. O. Visviri
			Pa	
	45	3.600	Pa	45 " " Humapalca
			Pa	36 " " "
5.300			Pa	50 " " "
			Pa	50 " " Coronel Alcérreca
			Pa	
5.000	41	2.900	Pa	30 " " Coronel Alcérreca
4.750			Pa	130 " " Coronel Alcérreca
5.350	55	700	Pa	130 " " Coronel Alcérreca
5.330			Pa	80 " " Coronel Alcérreca
5.000	45		Pa	70 " " Coronel Alcérreca
4.750	60		Pa	200 " " Arica
			Pa	
			Pa	225 " " Arica
			Pa	
4.530	60	700	Pa	220 " " Arica
	70		Pa	135 " " Zapiga
5.000	46	600	Pa	200 " " Huara
			Pa	140 " " Huara
			Pa	
			Pa	
4.780	60		Pa	130 " " Huara
			Pa	
			Pa	
5.300	55	1.800	Pa	180 " " Huara
			Pa	
5.000	55	200	Pa	33 " " Ugina
5.300	50	100	Pa	52 " " Ugina
5.000	40		Pa	56 " " Ugina
4.800	70	24	Pa	56 " " Ugina
4.500	60	60	Pa	12 " " Ugina
5.200	50	2.000	Ex	17,5 " " Puquios
5.000	65	13	Pa	12 " " Juma
5.100	50	200	Pa	19 " " Ugina
5.500			Pa	19 " " Ugina
5.000	40	200	Pa	30 " " Cosca
6.140	50	4.000	Ex	27 " " Ollaque
5.000	40	200	Pa	50 " " Ollaque
5.000	40	500	Pa	35 " " Ollaque
4.800	40	9	Ex	12 " " Buenaventura
5.600	55	500	Ex	14 " " Ollaque
5.300	45		Pa	13 " " Buenaventura
5.300	45	1.000	Ex	13 " " Buenaventura
	60		Pa	14 " " Polapí
5.000	70		Pa	14 " " Ascotán

	Nombre de la Mina Distrito Minero	Propietario	Departamento	Comuna	Latitud	—	Longitud
57	Colana	Justo Ballesteros	Loa	Calama	21° 57'	—	68° 07'
58	Cabana	Suc. Villoda	"	"	22° 04'	—	68° 04'
59	San Pedro				21° 58'	—	68° 26'
60	Putana	Suc. J. Goicovich y otros	"	"	22° 34'	—	67° 52'
61	Michina	Eugenio Freire Yáñez	"	"	22° 26'	—	68° 02'
62	El Tatío	Héctor Rojas	"	"	22° 26'	—	68° 01'
63	Sairecabur				22° 43'	—	67° 54'
64	Purico	N. Yutronic	"	"	22° 59'	—	67° 45'
65	Miscanti				23° 40'	—	67° 43'
66	Lascar	Suc. Juan Goicovich y otros	"	"	23° 22'	—	67° 44'
67	Puyagito				23° 50'	—	67° 37'
68	Socompa	Suc. Juan Goicovich y otros	"	"	24° 27'	—	68° 11'
69	<b>Incahuasi</b>				24° 19'	—	68° 06'
70	Coransoque	Juan de D. Carmona	"	"	24° 15'	—	68° 06'
71	Cerro Bayo				24° 24'	—	68° 25'
72	Pajonales	Suc. Alegre Quiroga	"	"	24° 19'	—	68° 15'
73	Pular				24° 15'	—	68° 12'
74	Llullaillaco	Suc. Alegre Quiroga	Antofagasta	Aguas Blancas	24° 43'	—	68° 33'
75	Lastarria	Danko Zlósiló P.	Taltal	Catalina	25° 09'	—	68° 31'
76	Tropezón del Chaco		"	"			
<b>PROVINCIA ATACAMA</b>							
77	Gorbea (Salar de Gorbea)	A. Cerviño	Chañaral	Chañaral			
78	Isolina y otras	Suc. Marangunic	"	"			
79	Lautaro	Lautaro Nitrate	"	"			
80	Los Gemelos	Cía. Salitrera Iquique	"	"			
81	Cerro de los Azufres	Cía. Salitrera Iquique	"	"	25° 28'	—	68° 43'
82	Juan de la Vega	Cía. Salitrera Iquique	"	"			
83	Infieles		"	"	25° 50'	—	68° 48'
84	Piedra Parada	Raúl Vásquez Estay	"	"	26° 13'	—	68° 43'
85	Juncalito		"	"	26° 27'	—	68° 38'
86	Pedernales (Tres Puntas)	Casareggio Hnos.	"	"			
87	La Coipa y Codocedo	Cía. Az. Chilena S. A.	Copiapó	Copiapó	26° 51'	—	69° 08'
88	Manto Coloso (Copiapó)	Cía. Azufrera Atacama	"	"			
89	Negro Francisco		"	"	27° 15'	—	69° 08'
90	Huasco	Manuel Zarricueta	"	"	28° 34'	—	69° 50'
<b>PROVINCIA COQUIMBO</b>							
91	El Toro	Enrique Abott V	Elqui	Paihuano			
92	Los Molles	Santos Martinac y otros	Ovalle	Monte Patria			
93	Yunque	Efraín del Canto Leiva	Illapel	Salamanca			
<b>PROVINCIA SANTIAGO</b>							
94	Nieves Negras		Santiago	S. José de Maipo			
<b>PROVINCIA COLCHAGUA</b>							
95	Molinana (Tinguiririca)	Soc. Az. Borlando y Cía	San Fernando	San Fernando	34° 49'	—	70° 10'
<b>PROVINCIA TALCA</b>							
96	Laguna Maule		Talca	San Clemente	36°	—	70° 26'
<b>PROVINCIA ÑUBLE</b>							
97	Chillán	Alberto Binyons	Chillán				
<b>PROVINCIA BIO-BIO</b>							
98	Callaquen	C. Mena y V. Menéndez	Laja	Sta. Bárbara	37° 55'	—	71° 25'
99	Copahue		Laja	"	37° 50'	—	61° 12'
<b>PROVINCIA CAUTIN</b>							
100	Pehuenco						
101	Pullul						
<b>PROVINCIA VALDIVIA</b>							
102	Rifinahue						
103	Volcán						
104	Azufrales						

**DE CHILE (Continuación)**

Altura m. s. n. m.	Ley % S	Cubicación Miles t	Actividad	Distancias
5.400	55	200	Pa	50 km. estación San Pedro
			Pa	57 " " San Pedro
			Pa	
4.500	65	300	Pa	120 " " Calama
5.300	50	50	Ex	170 " " Calama
5.300	70	40	Pa	170 " " Calama
			Pa	
5.000	54	2.200	Pa	142 " " Calama
			Pa	
5.000			Pa	80 " " San Pedro
			Pa	
5.000	45	2.300	Pa	10 " " Socompa
			Pa	
5.600			Pa	
5.000	55	300	Pa	100 " " Aguada de Cachinal
3.800	70		Pa	80 " " Catalina
5.200	95	60	Pa	144 " " Catalina
5.200	55	5.000	Pa	144 " " Catalina
			Pa	100 " " Catalina
4.600	50	660	Pa	100 " " Catalina
4.600	60	1.000	Pa	137 " " Catalina
3.780	50	1.000	Pa	137 " " Catalina
			Pa	
6.000	50	500	Pa	80 " " Potrerillos
			Pa	
5.450	40		Pa	86 " " Montandon
4.000	40	400	Pa	180 " " Copiapó
4.300	32	1.800	Pa	164 " " Copiapó
			Pa	
4.200	40	3.000	Pa	125 " " Vallenar
4.400	55	100	Pa	120 " " Vicuña
3.500	40		Pa	60 " " Juntas
			Pa	75 " " Salamanca
3.200			Pa	30 " " Volcán
3.600	50	500	Pa	80 " " Tinguiririca
2.560			Pa	170 " " Talca
2.500	50		Pa	113 " " Chillán
3.000	50		Pa	76 " " Santa Bárbara
2.000			Pa	
			Pa	
			Pa	
			Pa	
			Pa	
			Pa	

### C. GENESIS DE LOS YACIMIENTOS

Se ha dicho que los yacimientos de azufre nativo chileno están situados en las zonas de volcanes que se encuentran a lo largo de la alta Cordillera de los Andes. Considerando el estado de actividad de los volcanes se puede distinguir tres grupos: a) Volcanes completamente apagados; b) Volcanes en actividad manifestada por vertientes termales de agua o de vapor de agua y gases sulfurosos ( $H_2S$  y  $SO_2$ ) y c) Volcanes en actividad manifestada por erupciones de gases, cenizas y lavas.

La actividad volcánica comenzó durante el Terciario Superior y se prolongó hasta el Cuaternario. Las rocas de estas efusiones se componen de andesitas, dacitas, liparitas, riolitas, etc., que cubren totalmente la alta cordillera, desde la frontera peruana hasta el paralelo 28, y que en la provincia de Tarapacá se extienden casi hasta la costa. En los volcanes mismos, en sus laderas y en los valles vecinos existen también tobas, cenizas, piedra pomez y otros productos de erupciones volcánicas.

La erosión ha destruido la formación que comentamos en ciertas áreas y ha dejado a la vista formaciones mesozoicas y, en zonas aisladas, ha profundizado hasta las intrusiones graníticas.

Desde el paralelo 28°, que pasa por la estación Punta de Díaz, hacia el sur, existen efusiones terciarias y cuaternarias solamente en lugares aislados de la alta cordillera y corresponden a volcanes apagados del grupo (a) y a volcanes en actividad del grupo (b); en ellos se encuentran algunos yacimientos de poca importancia, siendo las azufreras Molinana, las más importantes, situadas en las laderas del volcán Tinguiririca. En ellas se produce todavía exhalaciones de gases sulfurosos que están formando azufre.

Es interesante observar que no existen yacimientos de azufre en los volcanes activos pertenecientes al grupo (c), es decir, que se encuentran en erupción, de la zona sur del país. (Quizapu, Llaima, etc.).

Los fenómenos físico-químicos que han dado origen a la depositación de azufre volcánico han sido expuestos en el capítulo "Fuentes para la obtención del azufre" y aquellas conclusiones de carácter general son válidas para los yacimientos de Chile, por lo que se omitirá su repetición.

Ateniéndonos a la génesis de los yacimientos se distingue 4 grupos, a saber:

a) Yacimientos formados por depositación de azufre, debido a reacciones entre gases sulfurosos

emanados del magma volcánico, que ascienden por grietas, cavidades y porosidad de las tobas, cenizas, escombros de falda, etc.

El azufre así depositado rellena los huecos de las capas al estado cristalino, constituyéndose en el cemento de ellas.

Mientras mayor sea la porosidad de las capas que se mineralizan, mayor será la cantidad de azufre que se deposita y, por consiguiente, mayor será la ley de la mina.

Los mismos gases ascendentes y los residuos de las reacciones que se han verificado, incluyendo algo de ácido sulfúrico, atacan también las rocas, principalmente los minerales ferrosos, adoptando la roca que constituye el yacimiento y las rocas vecinas color blanquizo muy característico. Cuando estas manchas blancas llegan hasta la superficie facilitan considerablemente la prospección.

Sin embargo, la presencia de manchas blancas no siempre corresponde a yacimientos.

Estas rocas alteradas tan intensamente, que constituyen la ganga de las menas, presentan graves inconvenientes durante el proceso de extracción del azufre por sus cualidades negativas en la flotación y en la refinación; ello exige una detenida investigación de laboratorio, precedida de un acucioso estudio petrográfico y microscópico de las rocas que contienen el yacimiento.

Para la ascensión de los gases sulfurosos desde el magma de origen hasta las capas de depositación, es preciso la existencia de conductos cuya cantidad y frecuencia son muy irregulares, lo que da lugar a la formación de yacimientos aislados de magnitudes muy variables dentro de una misma capa de roca.

Como las rocas que se han mineralizado han escurrido por las laderas de los volcanes en capas paralelas, los yacimientos también tienen una posición semejante.

Los yacimientos pueden encontrarse en la superficie, aflorando o cubiertos por una delgada capa de detritus, o bien, en mayores profundidades, donde los gases se han puesto en contacto con capas aptas para depositar el azufre.

Yacimientos de este tipo se encuentran en todos los distritos azufreros del país y en los volcanes en actividad con solfataras se está formando azufre en nuestros días. Algunos de estos yacimientos en for-

mación son explotados y el azufre tiene tan alta temperatura que es imposible tomarlo con las manos; los gases venenosos dificultan también la explotación.

b) Yacimientos formados por reemplazo metasomático, debido a la acción de los gases hidrógeno sulfurado, anhídrido sulfuroso, etc., sobre los minerales componentes de las rocas que atraviesan.

Para que se verifique este reemplazo es necesario que la roca contenga minerales solubles en los gases y líquidos ascendentes y cuya reacción permita la precipitación de azufre nativo, rellenando los huecos dejados por el mineral disuelto. Depende, pues, de la composición química de las rocas la intensidad del reemplazo. Como una misma roca volcánica tiene composición muy diferente se formarán en un mismo yacimiento sectores pobres y sectores ricos, lo que caracteriza a esta clase de yacimientos.

Sobre la magnitud, posición y demás características caben las mismas observaciones hechas para el grupo anterior.

c) Yacimientos formados simultáneamente mediante los dos procesos anteriores; es decir, por metasomatismo y por reacción entre los gases ascendentes, con precipitación de azufre.

Esta clase de yacimientos es la más común, lo que se explica porque las tobas, cenizas, escombros de falda, etc., son permeables y tienen abundantes huecos que facilitan la circulación de los gases y al mismo tiempo son aptas para el reemplazo.

Se encuentran representantes en todos los distritos azufreros del país y también se pueden observar yacimientos en actual formación en el distrito de Ollagüe.

El calor de las erupciones de lavas y tobas posteriores a la formación de yacimientos de los tres grupos mencionados, funde el azufre existente, dando origen a masas de azufre fundido dentro de los mismos yacimientos.

d) Existe una clase de yacimientos formados por extensos mantos de azufre fundido de alta ley, del orden de 70%, cuya génesis no tiene explicación satisfactoria con los procesos señalados anteriormente; se los interpreta como una corriente de azufre líquido que se habría fundido de la siguiente manera:

En el cráter o en los contornos de él se habrían formado yacimientos de los tipos corrientes, como los que existen hoy día en numerosos volcanes.

Cuando se avecina una nueva erupción, la presión ejercida por los gases y lava que tratan de salir produce calor, al que se suma en seguida el calor de las lavas, cenizas, etc., todo lo cual funde el azufre que al fin corre por las laderas del volcán junto con los demás productos de la erupción, y que al solidificarse forman nuevos yacimientos, los cuales son cubiertos por espesos mantos de cenizas, etc., que a su vez pueden contener yacimientos de azufre de las clases anteriormente mencionadas.

Representantes de esta clase de yacimientos de "azufre fundido" se encuentran en Tacora-Chupiquiña, y en el distrito de Ollagüe, en Santa Rosa, Aucanquilcha, Chutinga y Cecilia.

Como estos yacimientos suelen encontrarse en apreciables profundidades, existen posibilidades de aumentar las reservas de azufre ejecutando prospecciones sistemáticas, lo que hasta la fecha no se había hecho.

#### D. MINERALURGIA DEL AZUFRE

La producción de azufre se obtiene en Chile de las tres fuentes conocidas: de yacimientos de azufre nativo, de minerales piritosos y de recuperación de gases industriales.

Los procedimientos para extraerlo de las dos últimas fuentes están perfeccionados y su aplicación en las usinas existentes es excelente, de manera que en las nuevas usinas que se proyecta instalar se obtendrán los mismos buenos resultados. No sucede lo mismo con la extracción del azufre de los yacimientos de azufre nativo, cuyos resultados técnicos y económicos dejan mucho que desear.

En el apéndice "Procedimientos de extracción del azufre", se describen los procedimientos que se han empleado desde que se inició la industria azufrera mundial, y la evolución que han experimentado hasta nuestros días.

Las primeras explotaciones azufreras chilenas fueron de caliches de alta ley destinados a la fabricación de pólvora. Posteriormente tuvo otras aplicaciones y su demanda aumentó, la que no pudo satisfacerse con caliches de alta ley; entonces fue necesario refinarlos para elevar su contenido en azufre a valores comerciales. Se han experimentado diversos procedimientos de refinamiento con resultados poco satisfactorios y, aún los que hoy se utilizan, dejan mucho que desear por sus bajas recuperaciones, comparadas con las de procedimientos que se emplean en otras partes del mundo.

Haremos una breve reseña de lo que se ha hecho en este sentido:

1. **Calderas** Es el primer procedimiento que se empleó en el país desde los albores de la industria azufrera hasta el año 1900.

2. **Procedimiento por combustión parcial del azufre** Se ha ensayado la aplicación de hornos Gill, principalmente en la región del Tacora, con resultados negativos. Parece que las últimas tentativas fueron hechas en el año 1939 en las azufreras de la región mencionada.

Según informaciones obtenidas, el fracaso se debió a la obstrucción de los huecos para la circulación de los gases calientes a través de la masa caliche, por fácil disgregación de la ganga caolinizada que contiene el azufre, lo que apagaba la combustión.

3. **Retortas** Reemplazaron a las calderas a principios del presente siglo. Se ha empleado distintos tipos: fijas, rotatorias, intermitentes y rotatorias continuas. Se obtiene azufre de 99,5% de pureza; las recuperaciones son inferiores a 50%; hoy día las usan solamente para el tratamiento del azufre fundido proveniente de autoclaves con el objeto de producir azufre sublimado.

El alto consumo de combustible y la baja recuperación, son los factores principales que han inducido a substituir las retortas por los autoclaves.

4. **Autoclaves** Los autoclaves se usan en el país desde hace más de 35 años y se ha experimentado en escala industrial con diversos tipos: verticales fijos sin agitación, verticales fijos con agitación y horizontales rotatorios.

La ventaja que tienen los autoclaves sobre las retortas es el menor consumo de combustible, ítem importante en el costo de refino.

Actualmente se utilizan autoclaves en todas las empresas azufreras; la Compañía Adufrera Nacional usa autoclave horizontal rotatorio, y las demás, autoclaves verticales fijos sin agitación. Recientemente se está introduciendo el autoclave vertical con agitación.

La ley media del caliche que se beneficia es de 50% de S y deja los rípios con 30 a 40%, de lo que resultan recuperaciones inferiores a 50%, o sea, muy similares a las que se obtienen con retortas.

El azufre que resulta en el proceso de autoclaves, se presenta en forma de masas fundidas de

99,5% de pureza, que se tritura a colpas para la venta. Parte de azufre fundido se vuelve a tratar en retortas, para producir azufre sublimado y en molinos Raymond, para producir azufre ventilado, ambos productos tienen aplicación en la agricultura como abonos y desinfectantes.

Se ha intentado introducir algunas innovaciones en los autoclaves con el objeto de mejorar la eficiencia, pero su uso no ha prosperado, talvez porque no han sido tan evidentes las ventajas que se esperaban. Una de las últimas invenciones corresponde a la patente N-14026 de Mayo de 1955 que consiste en "Un autoclave para refinar minerales de azufre, que se caracteriza por estar constituido por un cuerpo central de refinación a vapor, directo o indirecto, con una cámara envolvente al mismo por la cual circula constantemente agua sobrecalentada, a presión, en circuito con la misma caldera del vapor del tratamiento".

Ultimamente la Corporación de Fomento de la Producción ha realizado estudios sobre el comportamiento de caliches chilenos en el autoclave japonés, que corresponde al tipo vertical fijo con agitación. Como estas investigaciones se hicieron en combinación con flotación, volveremos sobre el tema más adelante, después que nos hayamos referido a este proceso.

5. **Licuación en soluciones salinas.** Este procedimiento se experimentó a fines del siglo pasado y se volvió a insistir en los años 1938-1939. Se funda en la propiedad que tienen algunas soluciones salinas de elevar su temperatura de ebullición a medida que se aumenta la concentración, pudiéndose llegar hasta 119° C, que es la temperatura de fusión del azufre monoclinico. Las soluciones más usadas son de nitrato de sodio, cloruro de sodio y cloruro de calcio.

La operación consiste en agregar caliche finamente molido en soluciones calentadas a 119° - 120° C contenidas en estanques de hierro; el azufre se funde y se vacía en estanques de cemento o de madera donde cristaliza. Los rípios se lavan para recuperar las sales que contienen. El azufre resulta de 95% a 98% de pureza y hay que refinarlo en retortas.

Este procedimiento no ha tenido éxito por las siguientes causas: alto costo de las sales empleadas en las soluciones; pérdida de soluciones salinas en los rípios; dificultad para alcanzar en las alturas de las azufreras la temperatura de fusión del azufre y que las recuperaciones obtenidas no son satisfactorias.

6. **Flotación** La flotación de azufre fue introducida por la Caja de Crédito Minero hace 30 años, en combinación con fusión en autoclaves. La primera planta fue instalada en Amincha, cerca de Ollagüe, en la provincia de Antofagasta, para tratar los ripios provenientes de los autoclaves, con ley de 30% y 40% de azufre. También se ha flotado directamente caliches. Los concentrados resultan con leyes de 80% a 85% de azufre que se refinan en autoclaves; el resultado final es azufre fundido de 99,5% de pureza.

La práctica de la flotación continúa en la actualidad en dos establecimientos azufreros. La Compañía Azufrera Nacional también está instalando una planta de flotación en sus azufreras del Tacora.

La recuperación obtenida con el conjunto flotación-refinación es deficiente comparada con la de otros países que también emplean la flotación en combinación con diversos sistemas de refino; la descripción de algunos de ellos se dan en el apéndice. Las mejores recuperaciones obtenidas en Chile son del orden de 60%.

Esta deficiencia de la mineralurgia con caliches de nuestros yacimientos volcánicos es una de las causas por qué la industria azufrera nacional no ha prosperado a la par con otras ramas de la minería.

El sistema flotación-refinación se aplica con éxito en varios países, para diferentes clases de cali-

ches con leyes muy inferiores a las de Chile. No hay duda que con mayores investigaciones científicas debe encontrarse la solución para nuestros caliches.

7. **Investigaciones realizadas por la Corporación de Fomento de la Producción con la combinación "flotación-autoclave japonés"** La Corfo ha realizado interesantes investigaciones combinando los procesos de flotación y refinación en autoclaves del tipo japonés. Las experiencias se hicieron bajo la dirección del Doctor Kitaro Hayase (japonés), en las siguientes fases: pruebas de flotación en los laboratorios de la Empresa Nacional de Minería de Santiago; flotación en escala industrial efectuadas en la planta piloto de la Universidad Técnica del Estado en Antofagasta; experiencias de refinación con un autoclave de diseño japonés, tamaño laboratorio, y pruebas de refinación en un autoclave japonés importado por la Corfo realizadas en la fábrica de ácido sulfúrico en Antofagasta.

Las experiencias de flotación en laboratorio se hicieron con caliches de las azufreras Santa Rosa, Aucanquilcha, Purico, Azufrera Saciél y Tacora. Se efectuaron 138, de las cuales 72 se sometieron a refinación en un autoclave japonés tipo laboratorio.

Las pruebas de flotación, en planta piloto, se efectuaron con caliches de las azufreras Aucanquilcha y Purico; sus resultados se exponen en el cuadro N° 2.

## PRUEBA DE FLOTACION EN LA PLANTA PILOTO DE LA ESCUELA DE MINAS DE ANTOFAGASTA CORFO

Cuadro N° 2.

MINA	Ley %S	Tamaño malla	PH	Densidad % sólido	Aceite g/t	Ley de concentrado %S	Ley de los residuos	Recuperación %
Purico	54,3	—65	5	8	60	63,6	1,7	99,5
Purico	54,3	—65	5	10	68	62,5	1,7	99,6
Purico	54,3	—65	6	8	68	64,2	2,8	99,3
Purico	54,3	—65	6	8	90	67,7	4,2	98,4
Aucanquilcha	31,4	—65	5.5	11	90	65,9	4,1	92,7
Aucanquilcha	31,4	—65	5	10	85	67,4	2,0	96,0
Aucanquilcha	31,4	—65	5.5	11	75	66,0	3,1	94,4
Aucanquilcha	31,6	—48	5.5	11	90	66,0	5,6	90,0
Aucanquilcha	32,0	—48	5.5	10	90	60,4	2,0	96,9
Aucanquilcha	32,0	—48	5.5	10	75	56,9	2,8	96,0
Aucanquilcha	30,7	—48	5	12	90	64,4	3,0	94,6
Aucanquilcha	30,7	—48	5	12	90	59,9	3,0	95,0

Las experiencias de refinación en laboratorio se efectuaron con concentrados, caliches y rípios de las mismas azufreras mencionadas.

Las pruebas de refinación en autoclave japonés se efectuaron con concentrados producidos en la

planta piloto de flotación con caliches de Aucanquilcha; con concentrados producidos en la planta piloto de flotación con caliches de Purico y directamente con caliches de Aucanquilcha y Purico. Los resultados obtenidos se exponen en el cuadro N° 3.

### PRUEBA DEL AUTOCLAVE EN LA PLANTA DE LA FABRICA DE ACIDO SULFURICO EN ANTOFAGASTA—CORFO

Cuadro N° 3

PROCEDENCIA	Carga t.	Ley S %	Azúfre fino recuperado t	Agua t.	Soda kg/t.	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> kg/t.	Recuperación %
Concentrado de Aucanq. producido en la mina	1,300	77,0	0,913	1,34	1,15	1,35	91,2
Concentrado de Aucanq. producido en la Planta Piloto de la Escuela de Minas.	1,450	57,6	0,618	1,31	1,0	1,0	74
Concentrado de Aucanq. producido en la mina	1,985	77,0	1,391	1,67	1,1	1,0	91
Concentrado de Aucanq. producido en la Planta Piloto de la Escuela de Minas	2,157	61,1	1,079	1,53	1,8	1,0	82
Purico concentrado producido en la Planta Piloto de la Escuela de Minas	1,830	68,0	1,07	1,97	0,85	0,9	86
Caliche de Aucanq. Concentrados con caliches de Aucanq.	1,550 (0,833)	57,1 (57,1)	0,879	1,65	3,0	1,0	99,3
hechos en la planta	(1,270)	58,2)	1,117	2,19	1,7	1,5	91,9'
Caliches de Purico	1,560	53,9	0,836	1,53	2,4	1,0	99,4

Resumiendo, de los cuadros N° 2 y N° 3 se deduce que: La recuperación media resultante de las 12 pruebas de flotación ha sido ..... 96%

La recuperación media resultante de las 8 pruebas de refinación, ha sido .....89,4%

La recuperación media de la combinación flotación-refinación resulta: 0,96 x 0,894 .... 85,8%

La recuperación media debe superarse, al tratar un producto uniforme, sea caliche o concentrado,

previa determinación experimental de las condiciones óptimas en los procesos de flotación y refinación.

La Sociedad Azufrera Aucanquilcha ha instalado, en su planta de Amíncha, un autoclave japonés para refinar concentrados; sus rendimientos han sido satisfactorios, obteniéndose en circuito abierto recuperaciones de 83%, la que mejorará cuando el autoclave funcione en circuito cerrado con la flotación.

Se ha comprobado que el autoclave japonés es de más fácil funcionamiento y tiene menor consumo de combustible que los autoclaves nacionales. El éxito logrado en las experiencias y faenas industriales ha contribuido a decidir la ampliación de las plantas.

Hay que recordar que los yacimientos de azufre de Japón son también de origen volcánico, de leyes bastante inferiores a los chilenos y, usando el método combinado de flotación-autoclave japonés, están tratando caliches hasta de 17%, con recuperaciones de 80% a 85%, lo que permite aumentar considerablemente las reservas de caliches económicamente explotables.

### E. RESERVAS DE AZUFRE EN CHILE

Los yacimientos de azufre chilenos están ubicados, como ya se ha dicho, en la alta Cordillera de los Andes, donde el clima es extremadamente riguroso, las distancias son muy largas, y no hay medios de comunicación. Estos factores adversos dificultan el acceso para su estudio, por cuya razón son muy limitadas las informaciones sobre la magnitud de los depósitos existentes. Muchos de los yacimientos conocidos han sido trabajados temporalmente, en períodos de alza, explotando las zonas de alta ley, sin que se haya efectuado estudios de cubicación. Las escasas faenas que se han mantenido en labor continuada corresponden a depósitos ubicados en las proximidades de líneas férreas o caminos permanentes. En resumen, Chile es un país que cuenta con numerosos yacimientos, sin embargo, por las circunstancias y razones indicadas, un número muy limitado ha sido reconocido y explotado (Ver cuadro N° 1).

Por otra parte, dadas las limitaciones del mercado interno y agregadas las dificultades de la ubicación geográfica, las empresas han demostrado poco interés en ejecutar trabajos de prospección y reconocimiento; en consecuencia, las cifras de reservas que pueden informarse corresponde a aquellas que se establecen a través de labores de explotación en los yacimientos que están en desarrollo.

Además, como los costos de producción son muy elevados, las reservas estimadas se refieren a caliches, que, por su contenido en azufre, son económicamente explotables con los medios actuales, o sea, que tienen una ley que se estima del orden de 50% de azufre. Indudablemente que si con los nuevos procedimientos se logra bajar el costo de producción, lo que permitiría el tratamiento de caliches de menor ley, las reservas de los yacimientos explotables aumentarían considerablemente.

Las cifras sobre reservas que se dan en el presente estudio, se han obtenido de las propias empresas y de informes publicados e inéditos. En el cuadro N° 1 se consignan los tonelajes y las leyes aproximadas de los yacimientos que se conocen y en el cuadro N° 4 se resumen las reservas por provincias.

En el cuadro N° 1 se indican los nombres de los yacimientos cuando han sido individualizados y los nombres de los distritos que están constituídos por varios yacimientos no individualizados.

### RESUMEN DE LAS RESERVAS DE AZUFRE EN CHILE

Cuadro N° 4

PROVINCIAS	N° de Azufreras		Reservas	
	Cubicadas	Sin cubicar	Miles de t.	Ley %
Tarapacá	10	31	12.624	52
Antofagasta	18	17	14.072	51
Atacama	11	3	13.420	50
Coquimbo	1	2	100	55
Santiago	—	1	—	—
Colchagua	1	—	500	50
Talca	—	1	—	—
Ñuble	—	1	—	—
Bío-Bío	—	2	—	—
Cautín	—	2	—	—
Valdivia	—	3	—	—
	41	63	40.716	51

De 104 azufreras registradas sólo en 41 se tiene reservas cubicadas con un total de 40.716.000 toneladas de una ley media de 51%; de las otras 63 no se dan cifras por falta de reconocimiento, pero de muchas de ellas se conocen las leyes de los afloramientos y se sabe que son económicamente explotables.

Según la definición clásica se entiende por "Reservas" las cantidades de minerales que se estima pueden existir en un yacimiento, región o país, de los cuales es posible extraer productos utilizables de valor comercial, bajo las condiciones técnicas y económicas que imperan en el momento.

Como antónimo se tiene los "Minerales Potenciales"; se denominan así las cantidades de minerales que se estima pueden existir en un yacimiento, región o país, de los cuales se puede extraer productos utilizables que no tienen valor comercial bajo las condiciones técnicas y económicas que imperan en el momento, pero sí lo pueden tener si estos factores experimentan una reacción favorable,

La industria azufrera chilena presenta una característica especial: su capacidad productora es muy superior a la explotación actual, limitada al consumo interno del país; no tiene expansión hacia el exterior por el elevado costo de producción, debido a causas que más adelante se analizan. Estas circunstancias hacen que muchos yacimientos económicamente explotables se encuentren improductivos, por consiguiente, deberían figurar como "Minerales Potenciales".

Las leyes de la mayoría de los yacimientos de azufre nativo del mundo son inferiores a las de los yacimientos chilenos, sin embargo se les explota con costos competitivos. Este hecho permite albergar esperanzas de que está próximo el día en que se superen los factores adversos y se reduzcan nuestros costos de producción a límites que permitan competir con los productos foráneos en nuestro continente.

Por lo expuesto anteriormente hemos estimado conveniente considerar toda la cubicación conocida como "Reservas".

Si se hace una estimación de las "Reservas" no cubicadas y de los "Minerales Potenciales" basándose en los antecedentes conocidos, se llega fácilmente a una cifra total de 50 millones de toneladas de azufre fino.



## PRODUCCION Y COMERCIO

### A. PRODUCCION

#### 1. Producción mundial

En el cuadro N° 5 se indica la producción desde el año 1955 hasta 1960 por continentes y países, clasificada según la procedencia del azufre, en la siguiente forma:

- a) Proveniente de yacimientos de azufre nativo. No se hace diferencia entre azufre nativo sedimentario y azufre nativo volcánico.

b) Proveniente de la recuperación de gases naturales, industriales y otros.

c) Proveniente de yacimientos de piritas y otros compuestos sulfurados.

No se incluye la producción correspondiente al año 1961 porque solamente se dispone de cifras provisionales e incompletas.

#### PRODUCCION MUNDIAL DE AZUFRE EXPRESADO EN AZUFRE ELEMENTAL

- a) Provenientes de yacimientos de azufre nativo  
 b) Recuperaciones de gases naturales, industriales y otros  
 c) De piritas y otros compuestos sulfurados.

Cuadro N° 5

Países	Tipo	1955	1956	1957	1958	1959	1960
<b>AMERICA DEL NORTE</b>							
Canadá	b	26.392	30.357	91.354	142.615	290.982	510.500
	c	366.776	429.773	467.360	465.328	410.464	385.100
Estados Unidos	a	5.892.678	6.588.033	5.667.791	4.719.906	4.714.053	5.117.900
	b	405.160	472.194	518.679	650.337	697.389	778.800
	c	416.560	438.912	442.976	409.448	443.992	422.700
		<b>7.107.566</b>	<b>7.959.269</b>	<b>7.188.160</b>	<b>6.387.634</b>	<b>6.556.880</b>	<b>7.215.000</b>
<b>AMERICA CENTRAL</b>							
Cuba	c	64.008	32.512	17.272	17.272	12.192	—
México	a	488.175	775.630	1.024.042	1.256.720	1.331.855	1.299.700
	b	26.140	14.810	42.308	28.083	47.151	47.600
		<b>578.323</b>	<b>822.952</b>	<b>1.083.622</b>	<b>1.302.075</b>	<b>1.391.198</b>	<b>1.347.300</b>
<b>AMERICA DEL SUR</b>							
Argentina	a	17.933	27.735	29.249	32.050	30.480	25.400
Bolivia	a	4.039	3.473	795	398	—	1.200
Chile	a	57.239	37.868	18.788	24.399	20.320	31.400
	b	—	—	—	—	7.808	8.026
	c	2.749	6.594	6.126	8.623	—	2.460
Colombia	a	5.550	5.000	5.080	6.800	9.042	12.000
Trinidad	b	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.000
Venezuela	c	—	14.224	4.064	4.064	3.048	—
		<b>92.540</b>	<b>99.974</b>	<b>69.182</b>	<b>81.414</b>	<b>75.778</b>	<b>85.486</b>
<b>Totales</b>		<b>7.778.429</b>	<b>8.882.195</b>	<b>8.340.964</b>	<b>7.771.123</b>	<b>8.023.856</b>	<b>8.647.786</b>
<b>EUROPA</b>							
Alemania Occidental	b	72.034	59.944	79.959	73.965	78.029	84.100
	c	209.296	257.048	240.792	227.584	186.944	222.500
Alemania Oriental	b	95.489	94.232	101.793	106.354	106.680	107.100

<b>Países</b>	<b>Tipo</b>	<b>1955</b>	<b>1956</b>	<b>1957</b>	<b>1958</b>	<b>1959</b>	<b>1960</b>
Alemania Oriental	c	48.768	53.848	53.848	51.816	51.816	51.800
Bélgica-Luxemburgo	a	406	406	406	406	406	—
Bulgaria	b	1.164	2.241	2.632	2.845	2.845	4.100
	c	49.784	45.720	45.720	29.464	47.752	16.300
Checoslovaquia	c	136.144	142.240	155.448	161.544	167.640	157.500
España	a	6.604	6.299	3.410	5.759	3.556	2.100
	c	1.162.812	1.148.182	1.129.156	991.616	995.660	1.039.000
Finlandia	c	127.000	130.048	128.016	106.680	108.712	108.700
Francia	b	2.896	2.337	27.968	128.567	425.981	790.500
	c	135.128	137.160	136.144	146.304	130.048	116.800
Grecia	a	3.658	1.343	2.871	3.048	3.048	—
	c	101.600	105.664	103.632	72.136	88.392	56.900
Holanda	b	36.958	41.681	45.110	51.613	50.800	61.000
Inglaterra	b	46.625	53.820	49.768	50.354	55.880	53.800
	c	2.032	2.032	1.016	1.016	1.016	1.000
Italia	a	251.083	247.559	251.577	233.876	198.803	102.200
	b	5.080	5.080	2.032	4.064	5.080	4.100
	c	601.472	644.144	662.432	686.816	684.784	703.100
Noruega	c	468.237	465.716	462.431	430.909	395.337	427.000
Polonia	c	56.896	61.976	77.216	76.200	77.216	81.300
Portugal	c	317.464	318.945	323.774	292.987	305.694	312.800
Rumania	c	73.152	72.136	71.120	71.120	71.120	94.500
Rusia	a	203.200	203.200	203.200	304.800	325.120	375.900
	b	162.560	203.200	243.840	294.640	375.920	487.700
Suecia	b	28.874	30.823	33.843	34.000	38.177	38.600
	c	194.056	396.240	248.920	165.608	170.688	207.300
Yugoslavia	c	117.856	133.096	124.968	132.080	115.824	166.600
<b>Totales</b>		<b>4.718.328</b>	<b>5.066.360</b>	<b>4.983.042</b>	<b>4.936.171</b>	<b>5.268.988</b>	<b>5.874.300</b>
<b>ASIA</b>							
China	c	—	—	—	224.536	314.960	452.100
Chipre	c	643.128	782.320	804.672	806.736	453.136	523.200
Filipinas	a	3.759	—	1.321	1.321	—	45
	c	14	—	8.128	8.128	11.176	12.200
Irán	b	18.288	18.288	16.932	13.005	13.208	19.300
Japón	a	202.871	247.205	257.605	180.901	218.718	246.600
	c	1.149.096	1.316.736	1.426.464	1.400.048	662.432	1.470.100
	b	—	—	—	—	—	8.500
Taiwan	a	4.932	7.990	9.584	6.277	5.621	4.900
	c	11.176	11.176	12.192	12.192	13.208	16.300
Turquía	a	11.499	13.900	13.099	12.824	13.385	17.100
	c	8.128	9.144	23.368	39.624	42.672	20.300
<b>Totales</b>		<b>2.052.891</b>	<b>2.406.759</b>	<b>2.573.365</b>	<b>2.707.592</b>	<b>1.748.516</b>	<b>2.790.645</b>
<b>AFRICA</b>							
Algeria	c	10.160	3.048	8.128	11.176	12.192	17.300
Marruecos	c	1.016	—	2.032	6.996	5.080	5.100
Reps. Arabes Unidas	a	615	100	—	7.241	7.010	6.100
	b	3.815	2.997	3.500	3.048	2.446	18.000
Rodesia del Sur	c	9.144	8.128	8.128	24.384	17.272	19.300
Unión Sud-Africana	c	140.208	165.608	162.560	208.230	198.120	200.100
<b>Totales</b>		<b>164.958</b>	<b>179.881</b>	<b>182.348</b>	<b>260.225</b>	<b>242.120</b>	<b>265.900</b>
<b>OCEANIA</b>							
Australia	c	107.696	89.408	109.728	110.744	115.824	106.700
<b>Gran Total</b>		<b>14.822.302</b>	<b>16.624.603</b>	<b>16.189.447</b>	<b>15.785.855</b>	<b>15.399.304</b>	<b>17.685.331</b>

En el cuadro N° 6 se resume la producción anual de azufre durante el período 1955-1960 según las siguientes procedencias:

- a) De domos de sal, extraído por el procedimiento Frasch.  
Los únicos países donde se explota esta clase de yacimientos son Estados Unidos y México.

- b) De yacimientos volcánicos y sedimentarios; extraído mediante diversos procedimientos.  
c) De yacimientos de piritas y otros compuestos sulfurados.  
d) De recuperaciones de gases naturales, industriales y otros.

### RESUMEN DE LA PRODUCCION MUNDIAL DE AZUFRE SEGUN SU PROCEDENCIA

Cuadro N° 6.

Procedencia	1955 (1)	1956 (1)	1957 (1)	1958 (1)	1959 (1)	1960 (1)
Domos de sal (Frasch)	6.313.896	7.297.215	6.585.031	5.938.242	5.940.364	6.706.000
Otros yac. de azufre nativo	839.888	868.121	903.370	856.079	940.689	938.545
Total de azufre nativo	7.153.784	8.165.336	7.488.401	6.794.321	6.881.053	7.242.545
Piritas	6.731.557	7.421.574	7.445.839	7.402.558	6.314.567	7.416.060
Recuperaciones	936.961	1.037.693	1.255.207	1.588.976	2.203.684	3.026.726
<b>GRAN TOTAL</b>	<b>14.822.302</b>	<b>16.624.603</b>	<b>16.189.447</b>	<b>15.785.855</b>	<b>15.399.304</b>	<b>17.685.331</b>

(1) Datos obtenidos de "Minerals Yearbook" (1960)

Si del cuadro N° 5 se desglosan los países cuya producción total supera las 500.000 toneladas y se

separan según la procedencia del azufre, resulta el cuadro N° 7.

### PRINCIPALES PAISES PRODUCTORES DE AZUFRE — Año 1960

(Toneladas métricas)

Cuadro N° 7.

PAISES	PRODUCCION TOTAL t.	%	Prod. Frasch	Otros azufres nativo	Azufre Recuperado	De piritas
Estados Unidos	6.319.400	35,7	5.022.000	95.900	778.800	422.700
Japón	1.725.200	9,7	—,—	246.600	8.500	1.470.100
México	1.347.300	7,6	1.282.000	17.700	47.600	—,—
España	1.041.100	6,0	—,—	2.100	—,—	1.039.000
Francia	907.300	5,1	—,—	—,—	790.500	116.800
Canadá	895.600	5,0	—,—	—,—	510.500	385.100
Rusia	863.600	4,9	—,—	375.900	487.700	—,—
Italia	809.400	4,6	—,—	102.200	4.100	703.100
Chipre	523.200	3,0	—,—	—,—	—,—	523.200
Sumas	14.432.100	81,6	6.304.000	840.400	2.627.700	4.660.000
Totales Mundiales	17.685.331	<b>100,0</b>	6.304.000	938.545	3.026.726	7.416.060
% Sobre total Mundial	<b>81,6</b>		100	89,50	86,8	62,8

Los cuadros N° 5 y N° 6 indican cómo la producción mundial de azufre viene experimentando un constante aumento para alcanzar en el año 1960 a 17.685.331 toneladas. El aumento corresponde principalmente a la recuperación de azufre de gases, que de 936.961 en 1955 subió a 3.026.726 toneladas en 1960, o sea, se ha triplicado; el segundo lugar corresponde al azufre proveniente de piritas.

El incremento de producción de azufre recuperado debe continuar por dos razones: primero, porque los países altamente industrializados y los que se encuentran en proceso de desarrollo tratan de recuperarlo cada vez más de los gases de sus industrias, ya sea al estado de azufre elemental o indirectamente en algunas de sus aplicaciones, como es la fabricación de ácido sulfúrico, etc.; en segundo lugar, porque en los países que tienen fuentes de gases sulfurados naturales están activando su aprovechamiento.

A continuación se dan algunas cifras estadísticas de los años 1955 y 1960:

Francia de 2.896 toneladas ha aumentado a 790.500; Canadá, de 26.392 toneladas ha aumentado a 510.500 toneladas; Rusia, de 162.560 toneladas ha aumentado a 487.700 y Estados Unidos de 405.160 toneladas a 778.800.

El aumento de Canadá corresponde aproximadamente, en partes iguales, a la recuperación de gases naturales e industriales. La mayor parte de las plantas recuperadoras de gases naturales se encuentran en el oeste de Canadá, en Alberta y Columbia Británica.

La producción de Francia proviene, en su mayor parte, de la recuperación de gases naturales de la región del Lacq, por la Société Nationale de Petroles d'Aquitaine, empresa controlada por el Estado; los gases contienen un promedio de 15,2% H<sub>2</sub>S y 9,2% CO<sub>2</sub> y otros hidrocarburos aprovechables. Según datos provisionales la producción de azufre de Lacq fue de 1.400.000 toneladas en el año 1961.

Varios países latinoamericanos han instalado y están instalando plantas recuperadoras de los gases industriales, principalmente los que poseen refinerías de petróleo y fundiciones de minerales sulfurados; entre éstos se encuentran Chile, y Uruguay que proyecta recuperar el azufre de la refinería de petróleo (ANCAP).

El interés de contar con abastecimiento propio corresponde a una necesidad de progreso industrial de cada país y ésta es la causa de que hayan sido desplazados de muchos mercados los países que

antes ocupaban los puestos de vanguardia, Italia, que contribuía con el 95% de la producción mundial a principios del presente siglo ha descendido al 4,6% en 1960; Estados Unidos, que contribuía con el 85% en el año 1930 ha descendido al 35,7% en 1960.

## 2. Producción de Chile

Chile figura entre los países precursores de la industria azufretera. Ya se ha dicho que las primeras explotaciones de yacimientos de azufre nativo datan de los principios de la colonia. Si consideramos las estadísticas mundiales del presente siglo, Chile aparece entre los cinco primeros productores. En efecto, la producción mundial del año 1900 fue de 555.282 toneladas, distribuidas en la siguiente forma:

Italia	535.525	toneladas
Japón	14.211	"
Estados Unidos	3.147	"
Chile	1.661	"
España	738	"
TOTAL	555.282	toneladas

En esa época otros países extraían también azufre de piritas; en el mismo año 1900 se trataron 1.729.418 toneladas métricas de piritas (según "Mineral Resources of U. S."), pero no se indica la cantidad de azufre obtenido.

En Chile, además del azufre nativo, se extrae azufre de piritas en los establecimientos mineros; como subproducto de flotación diferencial en la planta de concentración de minerales de cobre. "El Teniente" produjo hasta 1958, y "Chuquicamata" inició su producción el año 1960.

El anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) proveniente de la tuesta de piritas se aprovecha para fabricar ácido sulfúrico, sin pasar por el estado de azufre elemental.

Desde el año 1959 en "El Teniente" se está recuperando el anhídrido sulfuroso de los gases de los convertidores de la fundición de concentrados de cobre para la fabricación de ácido sulfúrico.

Por consiguiente, Chile es productor de azufre de las tres procedencias: de yacimientos de azufre nativo, de piritas y de la recuperación de gases industriales.

La Empresa Nacional de Minería proyecta instalar una planta recuperadora de gases de convertidores, en la fundición de minerales de cobre de Paipote, para fabricar ácido sulfúrico.

En el cuadro N° 8 se consignan las producciones de azufre total de Chile desde el año 1900 hasta 1961. Hasta el año 1949 se da la producción por decenios y el término medio anual. Desde 1950 adelante se da la producción anual.

Hasta 1954 la producción proviene de la explotación de yacimientos de azufre nativo y desde 1955 se incluye el azufre de piritas y el azufre de gases industriales.

En el cuadro N° 5 se individualizan las tres clases de producciones.

### PRODUCCION DE AZUFRE EN CHILE DURANTE EL SIGLO XX

Cuadro N° 8

Año	Producción total t	T° M° por año	Año	T° M° por año
1900-1909	31.234	3.123	1954	59.075
1910-1919	108.800	10.880	1955	59.988
1920-1929	116.999	11.700	1956	44.462
1930-1939	117.927	11.793	1957	24.914
1940-1949	191.181	19.118	1958	33.022
1950		22.065	1959	28.128
1951		29.672	1960	41.886
1952		47.821	1961	58.479
1953		32.275		

En el cuadro N° 9 se indica la producción del país en el año 1961 distribuida por empresas y por calidad de productos comerciales. La producción total fue de 58.478,93 toneladas de azufre fino que se descompone como sigue: 44.699,93 toneladas al estado elemental y 13.779 toneladas de azufre fino como ácido sulfúrico, proveniente de piritas y recuperación de gases industriales.

El azufre elemental incluye el refinado y el contenido en caliches de alta ley de venta directa.

En 1961 se beneficiaron 105.215,82 toneladas de menas con ley media 55,57% y 17.877,34 toneladas de concentrados de 80% S.

### PRODUCCION DE AZUFRE EN CHILE EN EL AÑO 1961

Cuadro N° 9

Empresa	Producción de azufre fino en toneladas métricas					Totales
	Fundido	Sublimado	Ventilado	Para Abono	Caliche	
Cía Azufrera Nacional	8.079,80		2.247,78			10.327,58
Soc. Azufrera Aucanquilcha	21.424,85		1.161,75	761,37		23.347,97
Soc. Azufrera Borlando	2.692,59	3.335,01			3.199,30	9.226,90
Abdo Tala Larenas	965,15					965,15
Eugenio Freire	570,13					570,13
Miguel Urdangarin	262,20					262,20
Total azufre elemental	33.994,72	3.335,01	3.409,53	761,37	3.199,30	44.699,93
Chile Exploration Co. Proveniente de piritas						6.179,00
Braden Copper Co. De recuperación de gases						7.600,00
Gran Total						58.478,93

El beneficio de menas produjo 33.994,72 toneladas de azufre fundido a granel; 3.335,01 de azufre sublimado; 3.409,53 de azufre ventilado y 761,37 de azufre granulado para abono; total 41.500,63 toneladas de azufre fino contenido en productos con una pureza de 99,5%.

La cantidad de caliche vendida directamente fue de 5.980,06 toneladas con 53% de ley, lo que hace un fino de 3.199,30 toneladas.

El azufre fundido, también llamado azufre refinado, con 99,5% de pureza representa el mayor porcentaje de la producción y se vende en trozos a industrias varias; el sublimado y el ventilado se emplean de preferencia en la agricultura como desinfectante en los viñedos, árboles frutales, etc.; el caliche lo emplea la industria de la región nortina y su principal consumidor es el establecimiento minero de Chuquicamata para la fabricación de ácido sulfúrico.

## B. COMERCIO

### 1. Mercados y Precios Internacionales

Italia mantuvo el cetro de la producción mundial hasta principios del presente siglo, a pesar de la baja ley de sus yacimientos (15 a 20%). No obstante el alto costo de su producción, la falta de competencia, le permitía controlar el mercado mundial en volumen y precios.

El advenimiento del procedimiento Frasch para explotar los yacimientos ubicados en las costas de Luisiana y Texas, en el Golfo de México, hizo bajar considerablemente los costos de la industria y como consecuencia logró introducirse en el mercado a expensas del azufre italiano llegando a controlar el 85% del mercado internacional.

Posteriormente con el descubrimiento de los grandes yacimientos de azufre de domos de sal en el Istmo de Tehuantepec (México), también ex-

plotados con el procedimiento Frasch (1954), entra un nuevo y serio competidor para la industria norteamericana.

Siendo la producción del Golfo de México, (Texas, Luisiana y Tehuantepec) la de mayor volumen y menor costo, las empresas dueñas de estos yacimientos han tomado el control de los precios de este producto en el mercado internacional.

Sin embargo, con el impulso dado en los últimos años a la recuperación de azufre de los gases, el azufre Frasch ha perdido parte de su mercado en Europa. Así, por ejemplo, Francia, en los últimos tres años ha disminuido a la mitad la importación de azufre Frasch; en efecto, de 247.661 toneladas que importó en 1958, descendió a 126.169 toneladas en 1960; en cambio, se ha convertido en exportador de azufre Lacq, que en 1960 alcanzó a 404.000 toneladas (datos del "Minerals Yearbook 1960"), con destino a países europeos y a las costas asiáticas y africanas del mar mediterráneo.

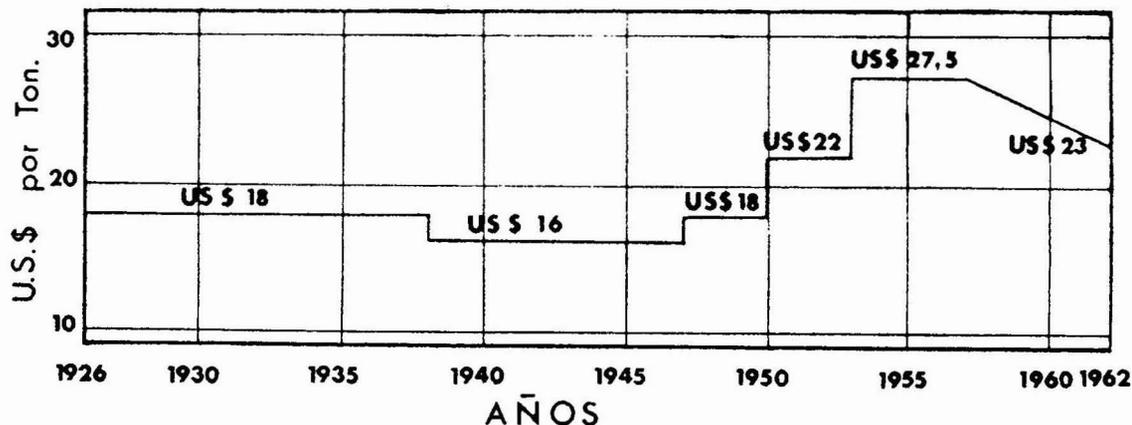
Como consecuencia de la evolución de las fuentes de producción de azufre, Italia ha desaparecido de la competencia mundial como productor de azufre nativo, por su elevado costo de extracción; en 1960 produjo sólo 102.200 toneladas. Pero en cambio, ha aumentado su producción de azufre de piritas la que en 1960 alcanzó a 703.100 toneladas. El Gobierno ha estado subvencionando a los industriales textiles que son grandes consumidores de azufre para estimular el consumo de este producto.

Resumiendo, aunque el azufre Frasch ha perdido terreno en el mercado mundial, siempre mantiene la supremacía, principalmente en los países alejados de Europa Central, y los precios siguen controlados por estas producciones.

Durante un cuarto de siglo (1926-1950) el precio del azufre FOB Golfo de México, se mantuvo entre 18 y 16 dólares por tonelada. Desde 1950 subió hasta alcanzar US\$ 27,5 en 1953, precio que se mantuvo estable hasta 1957. Desde esa fecha comienza la competencia y los precios declinan, hasta el nivel actual de US\$ 22,50 y US\$23,50 la tonelada FOB puerto del Golfo de México, según su ley.

## PRECIOS DEL AZUFRE FRASCH

F. O. B. PUERTO DEL GOLFO DE MEXICO



El gráfico adjunto muestra las variaciones experimentadas por los precios del azufre desde el año 1926 hasta 1962.

Para obtener los precios en puerto de destino hay que agregar a las cifras anteriores el valor del flete y demás gastos que sea necesario efectuar. Sin embargo, en los mercados cercanos a la competencia del azufre francés, los precios se han ajustado a US\$ 27,50 y US\$ 31 por tonelada CIF puerto europeo.

En los mercados de Sud-América, donde el azufre Frasch no tiene competidores serios, los precios varían entre US\$ 31 y US\$ 33 la tonelada CIF. El valor de los fletes marítimos entre el Golfo de México y costas de Chile varían entre US\$ 5 y US\$ 7 por tonelada.

Por el interés que tiene para una futura expansión del mercado para el azufre chileno se consigna en el cuadro N° 10 la producción e importación de azufre en los países sud-americanos durante el año 1960.

### PRODUCCION E IMPORTACION DE AZUFRE EN LOS PAISES SUDAMERICANOS EN 1960

Cuadro N° 10

Países	Producción t	Importaciones en t. y país de origen			
		EE.UU.	México	Chile	Total
Argentina	25.400	22.105			22.105
Bolivia				35	35
Brasil		132.502	8.108		140.610
Chile	58.479	87			87
Colombia		285			285
Ecuador		76			76
Paraguay		256			256
Perú		11.102		682	11.784
Uruguay		6.198			6.198
Venezuela		3.970			3.970
<b>TOTALES</b>		<b>176.581</b>	<b>8.108</b>	<b>717</b>	<b>185.406</b>

Este cuadro indica que, de los diez países sudamericanos, solamente Chile y Argentina son productores de azufre. Las importaciones durante el año 1960 ascendieron a 185.406 toneladas, provenientes de Estados Unidos 176.581, de México 8.108 y de Chile 717 toneladas. Brasil es el mayor importador 140.610 toneladas que vienen del Golfo de México.

Si la industria azufrera chilena lograra bajar los costos de producción, estaría en condiciones de competir en los países vecinos como ser: Argentina, Bolivia, Ecuador, Paraguay, Perú y Uruguay. Otros mercados, como Venezuela y Colombia, estarían fuera de competencia; en cuanto a Brasil la situación es dudosa y dependerá del nivel de precios a que se pueda llegar.

## 2. Comercio interno.

De las 58.479 toneladas de azufre producido en Chile en el año 1961, 13.779 corresponden a la fabricación de ácido sulfúrico para el consumo de la industria minera y las 44.700 restantes se distribuyen en 43.983 para el consumo interno y 717 para la exportación.

Las principales industrias consumidoras del país son las siguientes:

- Fábricas de explosivos
- " de ácido sulfúrico
- " de rayón y otras textiles
- Varias industrias químicas
- Agricultura como abono
- " . como desinfectante
- Refinación de petróleo
- Varias aplicaciones industriales de menor importancia.

La demanda del azufre tiende a aumentar debido al desarrollo industrial del país y a sus numerosas y variadas aplicaciones. Por lo tanto, es necesario estimular su consumo, y para esto es imprescindible agotar los recursos para reducir los costos de producción y bajar los precios de venta.

**Costos de producción.** Las cifras de costo consignadas en los párrafos siguientes corresponden al año 1961, período en el cual nuestra moneda tenía una equivalencia de E<sup>o</sup> 1.050 por dólar.

Los costos se pueden desglosar en los siguientes ítems:

- Costo de mina
- " de transporte de mina a planta
- " de refinación
- " de transporte de planta a puerto
- Gastos de embarque
- Gastos generales

**Costo mina.** La mayoría de los yacimientos de azufre chilenos se presentan en forma de mantos que afloran en gran parte de su extensión, o bien están cubiertos por una capa de detritus o rocas volcánicas de espesor variable, lo que permite explotarlos a rajo abierto en condiciones muy económicas; la relación entre estéril removido y caliche explotado es baja. Cuando aumenta el espesor de la cubierta o sobrecarga, se abandona la explotación, evitando labores subterráneas.

La explotación a rajo abierto es susceptible de mecanizarse pero una mecanización completa en las operaciones de arranque y carguío no es recomendable cuando prima la necesidad de obtener caliches de alta ley lo que exige hacer una selección del material durante el arranque.

Esta selección es necesaria con los procesos de refinación actualmente en práctica, ya que sus bajas recuperaciones obligan a beneficiar menas de alta ley, y es así como la ley media durante el año 1961 fue 55.57% S.

Lógicamente la restricción para adoptar métodos de explotación más económicos incide en el alza de los costos.

Los costos de mina varían según las características y ubicación de los yacimientos, pudiéndose fijar límites entre E<sup>o</sup> 10 y E<sup>o</sup> 14 por tonelada de azufre refinado. (1962)

**Costo de transporte desde mina a planta.** Normalmente las plantas de elaboración se encuentran en un nivel (cota topográfica) más bajo que las minas y a una distancia que varía entre 7 y 18 km. El transporte del caliche se hace en camión, en ferrocarril, en andarivel o por combinación de estos medios.

Los costos de transporte dependen de la ubicación de los establecimientos y de las condiciones de los caminos y varían entre límites muy distantes, desde E° 0.09 hasta E° 0.20 la tonelada-kilómetro, lo que puede representar hasta E° 1.60 por tonelada de caliche y E° 6.40 por tonelada de azufre refinado, si se acepta la proporción de cuatro toneladas de caliche para producir una tonelada de azufre refinado.

En azufreras mejor ubicadas el costo puede bajar hasta E° 4 por tonelada.

**Costo de refinación.** Uno de los ítems decisivos en el alto costo de producción del azufre chileno es la refinación y dentro de esta operación los factores más influyentes son: combustibles, dificultades en las operaciones derivadas de la baja temperatura del ambiente y, principalmente, la baja recuperación.

El costo actual se puede estimar entre E° 12 y E° 15 por tonelada de azufre refinado.

Si la recuperación subiera de 50% a 90%, lo que está dentro de lo probable, el costo de refinación bajaría en un 44%.

**Costo de transporte desde la planta hasta puerto.** La planta de la Sociedad Azufquera Borlando y Cía., ubicada en la estación Buenaventura, en la región de Ollagüe, es la única que se encuentra junto a estación de ferrocarril; las demás plantas están alejadas de red ferroviaria, de modo que el transporte a puerto debe hacerse en dos etapas: por camión, desde la planta a la estación, y desde ahí por ferrocarril hasta el puerto o zonas de consumo (Fábrica de explosivos de Calama, Chuquicamata, etc.).

Las distancias desde las plantas hasta las estaciones varían desde 12 kilómetros (Amincha-Ollagüe) a 125 kilómetros (El Tatio-San Pedro) y los cos-

tos de flete por tonelada-kilómetro fluctúan entre E° 0,045 para distancias largas hasta más de E° 0,10 para distancias cortas.

Los costos actuales de flete por ferrocarril hasta puerto son: E° 6 en el ferrocarril de Arica-La Paz, desde la estación Villa Industrial, que sirve a la Compañía Azufrera Nacional (Tacora), y E° 5,20 para el ferrocarril de Antofagasta a Bolivia, desde Ollagüe, que sirve a las azufreras de esa región.

De lo anterior resulta que los gastos totales de fletes desde planta a puerto fluctúan entre E° 7 y E° 9 por tonelada de azufre refinado.

**Costo de embarque.** Los gastos de movilización en el puerto y de embarque fluctúan entre E° 3 y E° 5, según se trate de Arica o Antofagasta, pudiéndose aceptar un promedio de E° 4.

**Gastos generales.** Los gastos generales de las azufreras nacionales actualmente en actividad se pueden desglosar en tres ítems: de los establecimientos, de los puertos y de la Gerencia en Santiago. Los montos de estos gastos dependen de la organización y pueden variar entre E° 15 y E° 20 por tonelada de azufre refinado.

Las empresas de menor magnitud no tienen gastos en Santiago y tienen una organización más económica en el norte, por lo tanto, los gastos generales pueden bajar a E° 5 ó E° 10 por tonelada.

Resumiendo, los costos de producción del azufre nacional, en las condiciones actuales de trabajo, pueden variar entre las siguientes cifras:

Items	Costo por t. de azufre refinado	
	Mínimo	Máximo
Costo de mina	E° 10	14
Costo de transporte de mina-planta	" 4	6
Costo de refinación	" 12	15
Costo de transporte planta-puerto	" 7	9
Gastos de embarque	" 3	5
Gastos generales	" 5	20

Según las cifras expuestas el costo más bajo para la empresa que reuniera las condiciones óptimas sería de E° 41 por tonelada FOB.

#### **Precio de venta .**

Por lo general, el azufre para el consumo interno se cotiza puesto carro ferrocarril en la estación de despacho, siendo de cargo del comprador los fletes y demás gastos hasta el lugar de destino. Los precios actuales fluctúan entre E° 40 y E° 42 la tonelada de azufre refinado a granel; a estos se agrega el flete y gastos de embarque, que fluctúan entre E° 10 y E° 14 la tonelada con lo cual los precios se elevan E° 50 y E° 56 la tonelada FOB.

Cabe tener presente que las cotizaciones del azufre del Golfo fluctúan entre US\$ 31 y US\$ 33 la tonelada CIF lo cual deja fuera de competencia al producto chileno en los mercados internacionales.

Teniendo en vista la precaria situación de la industria nacional, y a fin de abrir los mercados en Perú y Bolivia, se ha establecido un régimen de bonificación para la producción exportable de Arica, Ley N° 13.039, con lo cual los productores de esta zona obtuvieron una ayuda del orden de E° 20 a E° 22 por tonelada, lo que les permite bajar sus precios.

Los gastos de fletes marítimos desde Arica hasta San Antonio recargan el producto en E° 10 a E° 12 por tonelada, valor que se compara con los 7 y 9 dólares que representa el transporte desde el Golfo de México.

Finalmente, el azufre sublimado y ventilado tienen un precio superior y su comercio se rige por contratos especiales.



## NUEVAS INSTALACIONES EN LA INDUSTRIA AZUFRERA

Como se ha dicho en párrafos anteriores, los altos costos de producción del azufre chileno imposibilitan su colocación en el mercado externo y, a no mediar las medidas proteccionistas que la amparan corre el riesgo de ser desplazado del mercado interno. Tal situación resulta paradójica, si se tiene en cuenta que Chile es un país de abundantes reservas de azufre de alta calidad que, al mejorar sus métodos de explotación, podría crear una industria próspera y estable. Es por esto que debe insistirse en continuar las investigaciones hasta encontrar la solución adecuada aún cuando ello signifique sacrificios económicos que a corto plazo podrán ser recompensados.

El problema básico radica en la baja recuperación en los procesos mineralúrgicos, lo que obliga al tratamiento de caliches de alta ley, restringiendo la mecanización de las minas. A esto se agrega el transporte, que por ser muy accidentado, encarece el empleo de camiones y ferrocarril.

Ultimamente con la introducción del autoclave japonés, se está promoviendo cambios fundamentales en la planificación de la industria. Dos empresas dedican su mayor esfuerzo a la modificación de sus sistemas tradicionales con resultados muy promisorios.

La Sociedad Azufrera Aucanquilcha está adaptando en sus plantas el autoclave japonés con buenos resultados. Las mejoras en la mineralurgia representan sólo una solución parcial del problema, aunque posteriormente tendrá incidencia en los costos de la mina si se explotan caliches de menor ley.

La Compañía Azufrera Nacional ha elaborado un proyecto de explotación, refinación y transporte que revoluciona totalmente los actuales procedimientos. El proyecto consiste en lo siguiente: Explotación mecanizada de la mina con una producción de 620.000 toneladas anuales de 48% de ley. Al pie de la mina se instalará una batería de molinos de martillos de donde se obtendrán los siguientes productos:

Caliche sobre 20 mallas 120,000 tons. de 35% S,  
Caliche menos 20 mallas 500,000 tons. de 51% S.

El producto mayor de 20 mallas se deja en el desmante como rechazo y el producto menor de 20 mallas se envía en pulpa de agua por canaletas de concreto a través de 130 kilómetros hasta Lluta, donde se instalará la planta de flotación y refino.

Durante el trayecto de los 130 kilómetros el material se disgrega por rozamiento de las partículas entre sí y con el agua, quedando apto para la flotación.

El caliche, molido a la fineza requerida en el trayecto, se concentra por flotación; los concentrados de 71% se refinan en autoclaves verticales de operación continua.

Los rípios de los autoclaves, que salen con 35% de S, se repasan junto con el caliche fresco, con lo cual la alimentación de la flotación forma una ley media de 47% de S.

Los datos técnicos de la flotación son:

Común de alimentación (Caliche más rípio) .....	47% de S.
Concentrados producidos .....	71% de S.
Colas .....	15% de S.
Recuperación .....	85,3% de S.

El azufre refinado fundido se filtra a presión, agregando un reactivo que aglomera las partículas finas de la ganga que queda flotando en el azufre.

Resulta así un azufre refinado de 99,5% de pureza.

La recuperación total del proceso flotación-fundición, partiendo con caliches de 51% y rechazando colas definitivas de 15%, resulta de 78,5%.

Lluta se encuentra a más o menos 30 kilómetros distante de Arica, ubicación muy ventajosa para las operaciones de flotación y refino; desaparecen las dificultades de la cordillera por la baja temperatura y representa una economía en el costo de los materiales empleados en dichas operaciones, y en los alimentos para el personal.

Según lo informado por la empresa, se estima que el costo total de producción, puesto planta Lluta, es de US\$ 20 por tonelada. El flete en camiones

especiales, por camino pavimentado —30 kilómetros hasta el muelle de Arica—, se calcula en US\$ 1 por tonelada y el embarque en US\$ 1,50 con el nuevo muelle terminado.

Resulta así un costo de US\$ 22,5 la tonelada FOB' que se compara con el precio de venta de US\$ 31 a US\$ 33 del azufre Frasch.

Las inversiones necesarias, según el proyecto, para una explotación en las minas, de 620.000 toneladas de caliche y un tratamiento, en la planta de refinación, de 500.000 toneladas anuales, son del orden de US\$ 3.000.000 más un capital de trabajo estimado en US\$ 1.500.000, lo que hace un total de US\$ 4.500.000.

La producción anual será de 200.000 toneladas de azufre refinado.

De comprobarse en la práctica los costos anotados, se podría bajar considerablemente los precios de venta, con lo cual se estimularía el consumo nacional, tanto en la agricultura como en otras industrias, y, lo que es más importante, se pondría la industria azufreera en condiciones muy favorables para competir en el mercado sudamericano, cuya capacidad de importación es cercana a 200.000 toneladas de azufre, distribuidas según se indica en el cuadro N° 10.





## INCIDENCIAS DE LA MINERIA DEL AZUFRE EN LA ECONOMIA NACIONAL

### A. VALOR DE LA PRODUCCION

Con excepción de pequeñas cantidades exportadas a países vecinos, la totalidad de la producción de azufre se consume en el país; por consiguiente, el azufre no es actualmente un recurso mineral productor de divisas.

Sin embargo, por tratarse de un elemento que tiene innumerables aplicaciones en la industria, la agricultura, la medicina, etc., constituye una fuente de riqueza importante para la economía nacional.

El valor intrínseco del azufre está determinado por su precio de adquisición, el cual depende de la ubicación de sus mercados, en razón de los gastos de fletes y distribución. Según esto, los precios resultan muy variables, de ahí que se opta por tomar el precio en los centros de producción.

Consecuente con la anterior, se considera que el valor medio del azufre, puesto carro ferrocarril estación despacho, es de E° 42 por tonelada.

Luego, la producción del año 1961 de 44.670 toneladas se valoriza en E° 1.876.140.

### B. EMPLEO DE MANO DE OBRA

La industria azufrera, establecida en las provincias de Tarapacá y Antofagasta, ocupó durante el año 1961 el siguiente personal:

895 obreros, que recibieron durante el año	E° 331.196,74
39 empleados, que recibieron durante el año	E° 100.936,04
<hr/>	
934 funcionarios que recibieron durante el año	E° 432.132,78

Si se asignan tres familiares por cada uno, resulta una población de 2.802 personas que viven de la industria azufrera. Además existen otros servicios que dependen de esta industria, como ser, la explotación de yareta, que se usa como combustible; empresas de transporte de mina a planta y de planta a estación de ferrocarril; transporte por ferrocarril a puerto; movimiento del azufre en el puerto, etc. Todo lo cual representa un conjunto de actividades importantes en la zona norte del país.

## A P E N D I C E

### A. PROPIEDADES DEL AZUFRE

El azufre es un elemento químico no metálico cuyas propiedades físicas y químicas son muy variadas e interesantes y que hacen de él uno de los cuerpos que tiene mayor cantidad de aplicaciones. Esta variedad de propiedades físico-químicas tiene también su incidencia en los procedimientos mineralúrgicos de extracción del azufre de los minerales que lo contienen, lo que exige un conocimiento profundo de ellas para generalizar un proceso determinado, ya que el comportamiento varía con la clase de azufre.

Dentro del marco del presente estudio no es posible extenderse lo debido sobre esta materia, de manera que sólo haremos referencia a ciertas propiedades que consideramos de mayor interés,

#### Propiedades físicas:

**Color:** el azufre, a la temperatura ordinaria, es un sólido de color amarillo característico, pero que puede adquirir varias tonalidades, incluso puede tener color oscuro hasta negro, cuando contiene como impurezas sustancias carbonáceas.

**Lustre:** Craso diamantino.

**Cristalización:** se presenta en dos estados: cristalino (azufre lambda) y amorfo, (azufre mu). Las dos formas cristalinas más comunes son: el azufre alfa que cristaliza en el sistema rómbico y el azufre beta, que cristaliza en el sistema monoclinico.

Se conoce alrededor d 36 variedades de azufre que cristalizan en el sistema rómbico. A cada sistema cristalográfico corresponde cierto campo de temperatura dentro del cual permanece estable, pero saliéndose de sus límites cambia la forma crista-

lográfica. El único azufre estable a la temperatura ordinaria en el rómbico, que es de color amarillento claro y quebradizo.

El azufre monoclinico es estable sobre 95,6° C; debajo de esta temperatura pasa al estado rómbico. La temperatura 95'6° C se llama temperatura de transición.

El azufre rómbico se funde a los 112,8° C y el monoclinico a los 118,9° C. El azufre recién fundido es fluido y de color amarillo claro; si se aumenta la temperatura, al llegar a los 159,5 C se pone viscoso y cambia a color oscuro; a los 200° C se pone consistente como resina; y toma color pardo oscuro; a los 230° C el líquido es viscoso y negro. Más allá de 230° C la viscosidad decrece pero el color permanece oscuro y a los 400° C nuevamente se torna completamente fluido.

La temperatura de ebullición es 444,6° C, Si el azufre líquido en ebullición se enfría lentamente, pasa por todos los cambios de viscosidad y color en orden inverso hasta solidificarse al estado de azufre monoclinico.

En el azufre líquido se hallan las dos formas: cristalizado (lambda) y amorfo (mu) cuyo equilibrio depende de la temperatura, pero que se puede modificar por medio de catalizadores.

Estos cambios de las cantidades de las dos formas de azufre explican sus diferentes propiedades, especialmente las variedades del punto de fusión.

**Clivaje:** Imperfecto.

**Fractura:** Concoidal irregular.

**Dureza:** de 1,5 a 2,5.

**Peso atómico:** 32,06

**Peso específico:** A la temperatura de 20° C: el amorfo 1,92; el rómbico 2,07; el monoclinico 1,96. Líquido a la temperatura de 115° C, 1,808 y va decreciendo a medida que la temperatura aumenta.

**Conductividad:** El azufre es mal conductor del calor y de la electricidad. Si se frota produce electricidad negativa.

**Propiedades ópticas:** Investigaciones efectuadas sobre las propiedades ópticas del azufre han comprobado que es posible cambiar su conductividad.

**Propiedades químicas:** El azufre se combina con casi todos los elementos; no se combina con nitrógeno, oro, platino y yodo. Cuando se le expone a la temperatura ordinaria se oxida con formación de anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ); si la exposición es larga y la atmósfera está húmeda se forman pequeñas cantidades de ácido sulfúrico. Arde con llama azul desprendiendo un fuerte olor a anhídrido sulfuroso y a veces también pequeñas cantidades de anhídrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ).

Tiene gran afinidad con los halógenos, con excepción del yodo; con los álcalis e hidróxidos alcalinos, en presencia de agua, se forman sulfuros y tiosulfatos.

Con los metales forma sulfuros: con unos a la temperatura ordinaria (cobre, plata, mercurio, etc.) y con otros a mayores temperaturas (zinc, aluminio, estaño, hierro, etc.). Las reacciones se verifican con mayor rapidéz cuando los metales se encuentran pulverizados.

Con carbono forma una serie de compuestos orgánicos: alcoholes ésteres, aldehidos, cetonas, ácidos orgánicos etc.

El azufre es insoluble en agua. El ácido clorhídrico no lo ataca en presencia de grandes cantidades de hier.o. El ácido nítrico lo ataca en concentraciones de 13 a 40% a la temperatura ordinaria. El ácido sulfúrico concentrado lo ataca a la temperatura de 200° C con liberación de  $\text{SO}_2$ .

El azufre cristalino es soluble en sulfuro de carbono, pero no lo es el azufre amorfo.

Además del sulfuro de carbono existen varios líquidos orgánicos que disuelven el azufre; éter, petróleo, naftalinas hidratadas y benzoles clorados. Recientemente Chemical Products División of Crown Zellerbach Co., de San Francisco de California ha comprobado que el bisulfuro de dimetilo es un poderoso disolvente del azufre, más poderoso que el sulfuro de carbono.

## B. PROCEDIMIENTOS DE EXTRACCION DEL AZUFRE

Los procedimientos para extraer el azufre de sus diferentes fuentes son muy diversos y cada uno constituye una especialidad de la mineralurgia y/o de la química, como consecuencia del estado que se encuentra el azufre. Durante los últimos años se han realizado numerosas investigaciones para recuperarlo de las varias fuentes, patentándose diversos procedimientos. Especial atención se ha dedicado para extraerlo de yacimientos que lo contienen al estado nativo y para recuperarlo de los gases.

Dentro del objetivo del presente estudio sólo tiene interés el conocimiento de la extracción del azufre de los yacimientos que lo contienen al estado nativo, porque las principales reservas que existen en Chile están constituidas por azufre nativo en yacimientos de origen volcánico, y las investigaciones que se han realizado están orientadas para obtenerlo de esta fuente, ya que en Chile todavía no se ha encontrado la solución óptima.

La recuperación del azufre de gases es un problema resuelto y extensamente difundido, que no ofrece ninguna dificultad en su aplicación.

### Extracción del azufre de los yacimientos que lo contienen al estado nativo

Se sabe que el azufre nativo se encuentra en yacimientos de origen volcánico y en yacimientos sedimentarios, formados por rocas de muy diferente constitución y característica; además, está incluido bajo muchas formas según hayan sido los procesos de depositación del azufre: sublimación, reemplazo metasomático, etc. Estas circunstancias representan varias dificultades para la extracción del azufre.

Por otra parte, el azufre es un elemento que posee múltiples y complejas propiedades físicas y químicas que constituyen serias dificultades para cualquier procedimiento de extracción.

Basta recordar la variedad de formas cristalográficas que puede adoptar y las variaciones de fluidez que experimenta con los cambios de temperatura, todo lo cual restringe la zona térmica para su tratamiento. Por otra parte, las diferentes clases de ganga forzosamente tendrán efectos distintos en la marcha del proceso.

En general, puede decirse que todos los procedimientos empleados para la extracción del azufre nativo se basan en la separación, al estado líquido, mediante fusión o solución, para lo cual se ha experimentado numerosos métodos.

A continuación se hace una breve reseña de la evolución de los procedimientos usados en la industria del azufre.

### 1.—Procedimiento por combustión parcial del azufre:

a) **Calcarella:** Es el procedimiento más antiguo que se conoce y se practicaba en Sicilia desde los comienzos de la industria azufrera: Consiste en apilar caliche (mena de azufre) junto a una muralla y quemarlo libremente. La mayor parte del azufre se quema y el calor que produce funde otra parte de él. La recuperación es apenas 30% del azufre contenido y además es de mala calidad.

b) **Calcarone:** En el año 1842 se descubrió el procedimiento del calcarone que consiste en hacer grandes pilas de caliche enterradas en fosos o en la superficie con muros de sostenimiento; se le da forma cónica cuya altura es 1/7 a 1/5 del diámetro de la base. El fondo debe ser inclinado (10° a 15°) para que escurra el azufre fundido hacia un orificio que se encuentra en la parte más baja. La pila se forma con los trozos más grandes en el fondo, disminuyendo su tamaño hacia arriba; se cubre con una capa de fino, generalmente con residuos de operaciones anteriores.

Se procede al encendido desde la parte superior trasera, opuesta al orificio de salida del azufre fundido. La combustión debe ser lenta y regular, de atrás hacia adelante, para mantener la temperatura ideal para el caliche que se trata. Con temperatura muy alta el azufre puede espesarse y si es baja, el azufre coagula antes de llegar al orificio de salida; en ambos casos el aire no circula más y la combustión se detiene.

La calidad del azufre y la recuperación son muy superiores a las obtenidas con la Calcarella.

c) **Horno Gill:** En 1880 Gill Ruiz construyó un horno de albañilería compuesto de dos cámaras comunicadas entre sí; en una se quema el azufre de los residuos de la operación anterior y los humos de la combustión se hacen pasar a la otra cámara que está cargada con caliche fresco, produciéndose la fusión del azufre. Una vez agotado este caliche se invierte el funcionamiento. Se vacía la primera cámara, se carga con caliche fresco y se queman los residuos de la segunda,

Aunque la eficiencia mejoró, económicamente no se obtuvo ventaja apreciable.

d) **Horno Gatto:** En 1903, el Ingeniero Gatto construyó un horno Gill de cinco cámaras, llamado **pentiglia**, donde la circulación de los gases fue mejorada, obteniéndose mejores resultados.

En 1927 el mismo Gatto aumentó el número de cámaras a seis, llamado **sestiglia** y mejoró el control de los humos; se obtiene un funcionamiento continuo y mayor agotamiento de los residuos, con lo que ha aumentado la recuperación a 50% y disminuyen los costos de producción.

El consumo de azufre, como combustible, es de 47 kilogramos por tonelada de caliche tratado (Mina Cozzo Disi-Sicilia).

2. **Calderas:** Consiste en fundir con fuego directo el caliche colocado en calderas de hierro abiertas. El tiempo de fusión es del orden de 40 horas; después se vacía el azufre fundido en estanques rectangulares de piedra, donde, por diferencia de densidad, se forman tres capas: en el fondo los estériles más pesados, en el medio azufre bastante puro y en la parte superior una mezcla de azufre y ganga liviana, como cenizas volcánicas y otros fragmentos livianos.

Una vez frío se quiebra la capa superior, que se retira para dejar la capa de azufre descubierta. Los ripios se vuelven a fundir, operación que se repite tres veces, con lo cual obtiene una recuperación total de 66% del azufre contenido.

Este procedimiento se empleó en Chile el siglo pasado.

3. **Retorta fija:** A partir del año 1900 las calderas abiertas fueron reemplazadas por retortas cerradas de hierro fundido, que se calientan con fuego directo hasta producir la destilación; los vapores se condensan en una cámara contigua construida de ladrillos. Encima de la retorta hay tolvas comunicadas con ella, las que se cargan con caliche; éste se seca en las tolvas y se funde el azufre que pasa controlado a la retorta, donde la temperatura es superior a la de ebullición (447,5° C) y se produce la volatilización.

Si el enfriamiento de los gases de azufre es lento, la precipitación se efectúa al estado líquido; si el enfriamiento se produce rápidamente la precipitación se efectúa al estado sólido.

En el primer caso el azufre se llama granulado, y en el segundo caso, flor o sublimado.

En estas retortas se benefician caliches ricos y se refina azufre obtenido por otros procedimientos. La ley, en ambas formas, granulado y flor, es de 99,5% y la recuperación media se estima en 50%, no obstante que se puede alcanzar hasta 65% con un buen control de las operaciones.

El consumo de combustible es del orden de 200 kgs. de carbón ó 600 kilogramos de yareta por tonelada de azufre recuperado, con caliches de 50%.

4. **Retorta rotatoria:** Es una modalidad de la retorta fija, también con fuego directo, de forma cilíndrica con movimiento rotatorio. Hay dos tipos: intermitente y continua. A los problemas de corrosión de retorta fija, se añade complicaciones mecánicas.

Se mejoran las recuperaciones pero se aumenta el costo de elaboración y el capital invertido también es mayor.

El consumo de combustible es 30% inferior al de la retorta fija.

5. **Autoclave:** Consiste en un cilindro de hierro fundido revestido interiormente con ladrillos refractarios de resistencia mecánica adecuada a una presión interior de cuatro atmósferas. La relación entre el diámetro y el largo del cilindro es variable.

El procedimiento consiste en extraer el azufre de las materias primas que lo contienen (caliches o concentrados) por medio de la licuefacción, empleando la acción directa del vapor de agua sobrecalentado a presiones escalonadas hasta cuatro atmósferas.

Opcionalmente el material a tratar puede ser adicionado de agua hasta la proporción de 1 por 1 en peso de la carga y de algunos agentes que modifiquen el ph y la tensión superficial de la fase azufre fundido-ceniza.

El principio fundamental, para lograr los mejores resultados con los autoclaves, consiste en mantener la carga a la temperatura de mayor fluidez del azufre (119,° C), durante el tiempo necesario para que escurra formando gotas que, por diferencia de densidad, se separan de las impurezas. Dada la variedad de caliches que existen en la naturaleza y las numerosas y complejas propiedades físicas y químicas que tiene el azufre, deberá determinarse para cada caliche la duración del paso del azufre de la fase sólida a líquida. Esta es la etapa más delicada del proceso. El carácter de la ganga influye también en la coalescencia.

El principio es sencillo, pero sin duda es un proceso físico-químico complejo, que está regido por leyes de la tensión superficial y de la química coloidal. Existen tres tipos principales de autoclaves: fijos sin agitación, fijos con agitación y rotatorios. El funcionamiento de los tres tipos es intermitente.

a) **Autoclave fijo sin agitación:** Es vertical y se carga por arriba por una puerta de cierre hermético; se introduce vapor sobrecalentado por dos o más orificios y se mantiene a una presión de 4 atmósferas durante el tiempo necesario para que se desprenda el azufre fundido y escurra al fondo del autoclave; se cierra la entrada del vapor y se abre la válvula de salida del azufre, que se encuentra en el fondo, que sale impelido por la presión que existe en el interior; terminada la purga de azufre, se cierra la válvula; se baja la presión a unas dos atmósferas y se destapa en forma repentina la salida del ripio que al salir en forma explosiva queda prácticamente limpio el autoclave; se soplan con vapor todas las aducciones y válvula de sangría del azufre; se tapa abajo y se destapa arriba para comenzar un nuevo ciclo.

Se obtiene azufre con 99,5% de pureza y ripios con 40% aproximadamente. La recuperación es del orden de 50%.

El consumo de combustible es del orden de 20 kg de carbón y 60 kg de yareta por tonelada de azufre recuperado; el consumo de agua es de unos 130 kg por tonelada de material beneficiado.

b) **Autoclave fijo con agitación:**

**Tipo japonés:** Consta de un cuerpo cilíndrico vertical con tapas en forma de casquetes esféricos; la altura es aproximadamente 1,5 veces el diámetro del cilindro. Está revestido interiormente con ladrillos refractarios o con un forro de lana de vidrio. En el fondo lleva dos válvulas del tipo de asiento, una para la descarga de azufre fundido y la otra para el ripio. La carga se efectúa por el casquete superior. El cuerpo cilíndrico tiene un eje vertical, dotado de dos hélices, accionado por un motor y sistema de reducción de velocidad; el número de revoluciones del eje es del orden de 45 por minuto.

El principio del proceso es el que se ha descrito anteriormente, con las variantes que el material se moja con 0,7 a 1 de agua por 1 de carga, en peso, y la agitación, cuyo objetivo es facilitar el encuentro entre las partículas de azufre fundido para formar gotas que permitan el escurrimiento y la separación.

ración de la ganga. Se agrega además reactivos para obtener el ph necesario y disminuir la tensión superficial con el objeto de facilitar la coalescencia. Las condiciones de operación son las siguientes:

a) Agua	0,7—1,0 t/t.
b) Reactivos: $\text{Na}_2\text{CO}_3$ y $\text{Na}_3\text{SiO}_3$	ph=8 más o menos
c) Presión del vapor	4 atmósferas
d) Tiempo del vapor	27 a 45 minutos
e) Total tiempo de operación	110 a 150 minutos
f) Grado de molienda	Menos de 48 mallas

Los resultados que se obtienen son superiores a los de los demás autoclaves; cifras se han dado al describir las experiencias hechas con caliches y concentrados chilenos.

c) **Autoclave rotatorio:** Es un cilindro giratorio horizontal de hierro fundido y revestido con ladrillos refractarios. El largo puede ser hasta tres veces el diámetro.

La carga molida a 48 mallas se moja en la proporción de 1:1; se hace girar el autoclave a una velocidad de 6 a 8 revoluciones por minuto; se introduce vapor recalentado hasta 4 atmósferas durante 45 minutos; se descarga el azufre fundido; se tapa la salida del azufre; se vuelve a poner en rotación y se descarga el vapor hasta la presión atmosférica; se descargan los ripios con agua sobre un harnero de  $\frac{1}{8}$  de pulgada donde queda retenido el azufre granulado que contienen los ripios.

El ciclo completo demora 2 1/2 horas; el azufre refinado tiene 99,8% y el harneado 96,2%; se obtienen recuperaciones superiores a las del autoclave fijo sin agitador.

El consumo de carbón es de 38 kg y el de agua 268 litros por tonelada de material tratado.

Se usan en Sicilia, Japón, Chile, etc.

6. **Sistemas a solventes:** Se ha tratado de extraer el azufre elemental de yacimientos volcánicos y sedimentarios por medio de solventes. Se ha experimentado con numerosos solventes pero sólo mencionaremos los tres que se consideran los más importantes: uno antiguo y dos de experiencia reciente.

a) **Sulfuro de carbono:** Es uno de los solventes de azufre más antiguos y que más se ha utilizado; pero los resultados obtenidos son contradictorios. Es un solvente de alto poder que deja los ripios prácticamente exentos de azufre, pero tiene varios inconvenientes: su empleo requiere alto capital invertido, es muy inflamable, muy explosivo y

tóxico, todo lo cual exige trabajar con un exceso de precauciones para evitar accidentes. En resumen, es un procedimiento caro. El trabajo es intermitente.

El azufre se recupera del solvente por cristalización o por destilación; el azufre que se obtiene es muy puro.

Se puede tratar caliche de baja ley y de alta ley. Por tratarse de un proceso muy difundido y sobre el cual existe numerosa literatura, no nos excederemos más aquí.

b) **Fuel Oil:** En el año 1959 se ha experimentado con el fuel oil como solvente con caliches de 30% a 40% de azufre en proceso continuo y en caliente. La solución se separa de los ripios y éstos se lavan con agua caliente. El azufre se precipita enfriando la solución que lo contiene y el solvente se recupera volviendo al circuito.

Se anuncia que se ha obtenido buenos resultados, pero no se han difundido lo suficiente.

(Informaciones obtenidas del Mineral Year-book 1959).

c) **Bisulfuro de dimetilo:** La Crown Zellerbach ha efectuado experiencias en el Instituto de Investigaciones de la Escuela de Minas de Colorado (U. S.A.) con un nuevo solvente, el bisulfuro de dimetilo, cuyos resultados los exponen los señores F. Dale Huiller y C. J. Lewis en la revista World Mining del mes de Julio de 1961 y que resumimos a continuación:

Las experiencias se han efectuado con menas de baja ley de Sicilia y otras partes.

Con molienda de 10 mallas y temperatura entre 85% y 90% C, se obtuvieron recuperaciones de 99%.

Con molienda de 1/4 de pulgada y las mismas temperaturas, las recuperaciones fueron de 91%.

Ley de los ripios del orden de 0,2% S.

Tiempo de lixiviación, 15 minutos.

El azufre se recupera por enfriamiento lento de la solución que cristaliza en octaedros con una pureza de 99,9%.

El solvente, que se mantiene como humedad de los cristales de azufre, se recupera lavándolo con chorros de vapor.

Consumo de solvente, 20 libras por tonelada de azufre cristalizado, lo que representa la quinta parte del consumo de sulfuro de carbono, pero como el precio del bisulfuro de dimetilo es aproximadamente cinco veces mayor, quiere decir que ambos solventes se equiparan en el costo de tratamiento.

Se hicieron investigaciones con concentrados de azufre de 85% y los resultados fueron también muy efectivos.

Haciendo una comparación entre los solventes bisulfuro de dimetilo y sulfuro de carbono, se tiene:

a) Ventajas del bisulfuro de dimetilo:

1. Adaptabilidad al trabajo continuo.
2. El cambio de solubilidad con la temperatura, permite una cristalización controlada.
3. Mayor capacidad solvente a la presión atmosférica.
4. Se necesita menos calor y
5. Menos peligro de incendio y explosiones.

b) Desventajas del bisulfuro de dimetilo

1. Mayor costo unitario de reactivo, aunque el costo de solvente es aproximadamente igual en ambos procesos.
2. Formación de pequeñas cantidades de trisulfuro de dimetilo durante la extracción, el que produce un fuerte olor que debe ser eliminado.

**7. Flotación:** La mayoría de los yacimientos de azufre nativo, volcánicos o sedimentarios, son de baja ley, la que fluctúa entre 10% y 40%, pudiéndose aceptar un promedio de 25%. Chile es una excepción, tiene yacimientos de 80% y 90% con un promedio de 40%.

El tratamiento directo de caliches pobres por fusión o lixiviación es caro y el exceso de ganga perjudica los procesos. Esta circunstancia ha inducido a los investigadores, al igual que en la metalurgia de tantos otros minerales, a enriquecer la materia prima por medio de la flotación. Pero la flotación no eleva la ley más allá de 85% de S, o sea, no es un producto comercial, que requiere una pureza superior a 99%; de manera que la flotación

por sí sola no entrega un producto acabado que se pueda usar en las industrias, y se utiliza esta operación como previa a otros procesos de refinación, sea por fusión, sea por lixiviación. Esta combinación de los dos procesos, flotación y refinación, ha dado espléndidos resultados en numerosas minas, eso sí, que en cada caso es necesario investigar separadamente cada operación, debido a los diferentes caracteres de los componentes de las menas, como ya se ha anotado en otra oportunidad.

La práctica de la flotación es muy conocida, de manera que prolijas experiencias deben llevar a obtener óptimas recuperaciones y altas leyes de los concentrados, para aplicar enseguida el sistema de refinación más conveniente a las características de los concentrados y las recuperaciones del refino para obtener los mejores resultados económicos finales.

Mencionaremos solamente algunos ejemplos:

En Francia: La Societé Languedocienne de Recherches et d'Exploitations Minières en su mina Narbonne concentra por flotación menas con 8% de azufre provenientes de yacimientos sedimentarios en formaciones complejas de esquistos arcillosos bituminosos, yeso y margas gredosas, con potencias de 40 a 50 metros e inclinaciones de 10° a 15°. La explotación se ejecuta a tajo abierto.

En la flotación se muele el mineral a 60 mallas y se obtiene concentrados de 75 a 80%. La ganga está constituida por partículas muy finas, más que las del azufre, de esquistos, margas gredosas y arcillas incluso al estado coloidal.

Los concentrados se funden y la masa fundida se filtra a presión. El azufre resultante no es muy puro porque retiene cuando se encuentra líquido partículas finas de ganga en suspensión, lo que hace bajar la ley.

Para eliminar estos inconvenientes se agrega un reactivo que aglomera las partículas finas de ganga que flotan en el azufre fundido; enseguida se tamiza en una plancha con perforaciones de 4 milímetros. El azufre que pasa tiene leyes de 99,5%; la ganga aglomerada que queda sobre la plancha retiene azufre que vuelve al circuito molienda-flotación.

La recuperación de la refinación, tratando concentrados de 80% de azufre alcanza a 96%. La recuperación de la flotación varía con la ley de los concentrados que se desea obtener; para concentrados de 75% a 80% las recuperaciones son cercanas a 95%.

Ante el éxito de la planta de la mina Narbonne se ha experimentado con menas de Italia, Grecia, Turquía, Argentina y Ecuador en laboratorios y plantas piloto. Incluso se ha experimentado con menas de ley 70% directamente con la etapa de refinado, obteniéndose buenos resultados; pero el mayor éxito se tiene tratando concentrados de mayor ley.

Con menas italianas se ha aplicado el procedimiento completo, obteniéndose en la flotación concentrados de 85% de azufre con recuperaciones de 98% y sometidos al refinado de Languedocienne se obtuvo azufre de 99,5% y recuperación 96%; es decir, la aplicación completa del procedimiento acusa recuperación total de 94%.

Referencia: World Mining - Mayo de 1953.

En Italia: En la mina Cozzo Disi —Sicilia— el azufre se encuentra al estado nativo en yacimientos sedimentarios de calizas y yesos, cuyas leyes tienen un promedio de 15% de azufre. Hasta hace una década la extracción del azufre se hacía en hornos Gill compuestos de seis cámaras (seistigia), donde se obtenía una recuperación de 50%.

Se necesitaba tratar 10 toneladas de mena para obtener una de azufre refinado.

En 1953 se introdujo la flotación en una planta de 400 toneladas diarias; con una molienda de 65 mallas se obtiene una recuperación de 90%. Los concentrados se refinan fundiéndolos en marmitas y la masa fundida se filtra a presión en filtros Niagara. El azufre resulta con una pureza de 99,6%. Se necesita 6 toneladas de mena para obtener una de azufre.

No obstante estas mejoras, el costo de producción era tan subido que quedaba fuera de toda competencia internacional y para mantener la industria la Compañía recibía una subvención del Gobierno. La causa principal del alto costo es la baja ley de la materia prima.

Referencia: World Mining — Noviembre 1959.

En Chile: Desde hace muchos años se ha experimentado en Chile la flotación de menas de azufre y su refinado en autoclave con diferentes variaciones que pretenden mejoras de la recuperación en estos últimos.

Existen plantas funcionando con resultados no satisfactorios, pero en los últimos tiempos se ha experimentado en laboratorios y plantas pilotos tratando de mejorar los resultados, con bastante éxito.

En la parte de este estudio que se refiere a Chile se trata en detalle algunos de estos procedimientos en uso.

En Argentina: La Sociedad Minera Argentina S. A. es dueña de las minas de azufre Volcán Overo, situadas en la provincia de Mendoza, en el Sosneado, a una altura de 4.400 metros s.n.m. El azufre es nativo de origen volcánico de ley media 35%; la explotación se efectúa a rajo abierto, solamente durante cuatro meses del año, debido al riguroso clima.

El caliche se baja por un andarivel de 12,6 kilómetros de longitud hasta la altitud de 2.400 metros, donde está la planta de refinado compuesta de flotación y autoclaves de 200 toneladas diarias de capacidad.

Las menas se muelen a 28 mallas y se funden en los autoclaves, cuyo producto enfriado se hanea en cribas de 28 mallas; el producto superior a 28 mallas está formado de glóbulos de azufre con 96% de pureza el que se funde y filtra a presión; el producto bajo 28 mallas se flota, obteniéndose concentrados de 93% que se funden junto con el producto anterior.

Los resultados son: azufre de 99,5% de pureza y recuperación total de 90%.

Referencias: Engineering and Mining Journal — Enero 1960 y Sulphur de Agosto de 1961.

### C. USOS DEL AZUFRE

El uso del azufre se ha generalizado en tal forma que ha llegado a ser absolutamente necesario para el desarrollo industrial de las naciones. Está considerado entre las cuatro materias primas básicas de la industria química, junto con la sal, carbón y carbonato de calcio.

Sería largo enumerar todas las aplicaciones que tiene el azufre, pero se puede reunir en las siguientes industrias.

1. Fábrica de ácido sulfúrico, que a su vez se constituye en materia prima de numerosas industrias químicas.
2. Agricultura: como abono y desinfectante.
3. Industria del papel.
4. Industria de la goma.
5. Beneficio de minerales.
6. Fabricación de explosivos.
7. Industrias textiles: fabricación del rayón, descolorante, etc.
8. Medicina: dermatología, etc.

9. Productos plásticos.
10. En la construcción.
11. Varias aplicaciones.

Es interesante destacar la aplicación del azufre en la industria de la construcción. Debido a sus propiedades físicas y químicas, especialmente su escasa conductividad del calor y de la electricidad y de su resistencia a mojarse con el agua, se emplea en la fabricación de materiales aislantes y de materiales destinados a la construcción. Se puede citar los siguientes ejemplos: en la fabricación de cemento para construcciones que están sometidas a cambios bruscos de calor; en la construcción de estanques para ácidos y otras sustancias corrosivas; mezclado con sustancias inertes, como asfalto u otra sustancia similar, se obtiene un producto muy valioso para rellenar juntas e impermeabilizaciones de construcciones, especialmente en los techos de los edificios. En vez de formar mezclas se puede emplear para impregnar cuerpos porosos sumergiéndolo

los en el azufre fundido; se puede impregnar areniscas, ladrillos de construcción y cualquier roca porosa; materiales fibrosos, como madera, asbestos, etc.

Las propiedades de los materiales resultantes mejoran notablemente, sea como impermeabilizadores, aislantes del calor y de la electricidad o su resistencia física. Así, en una arenisca densa impregnada con 10% de azufre, la resistencia a la compresión aumenta de 600 kg/cm<sup>2</sup> a 2.000 kg/cm<sup>2</sup>.

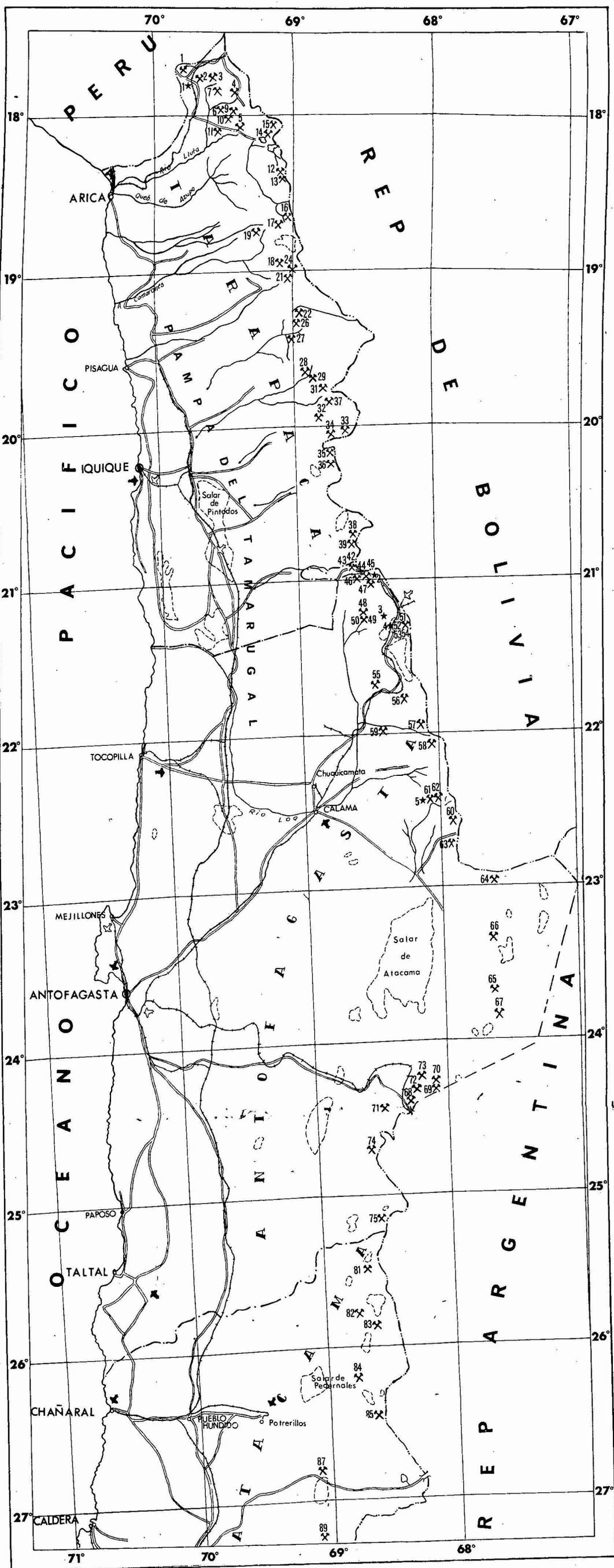
Entre las aplicaciones varias se cuentan la refinación del petróleo, la industria de pinturas, anilinas, jabones, pergamino, celuloide, vidrio, industria del cuero, alcoholes, betunes, purificación de aguas, desodorantes, metalurgia, descolorantes, fósforos, etc.

Se estima que en la fabricación de un automóvil se emplean 16 kg de azufre.

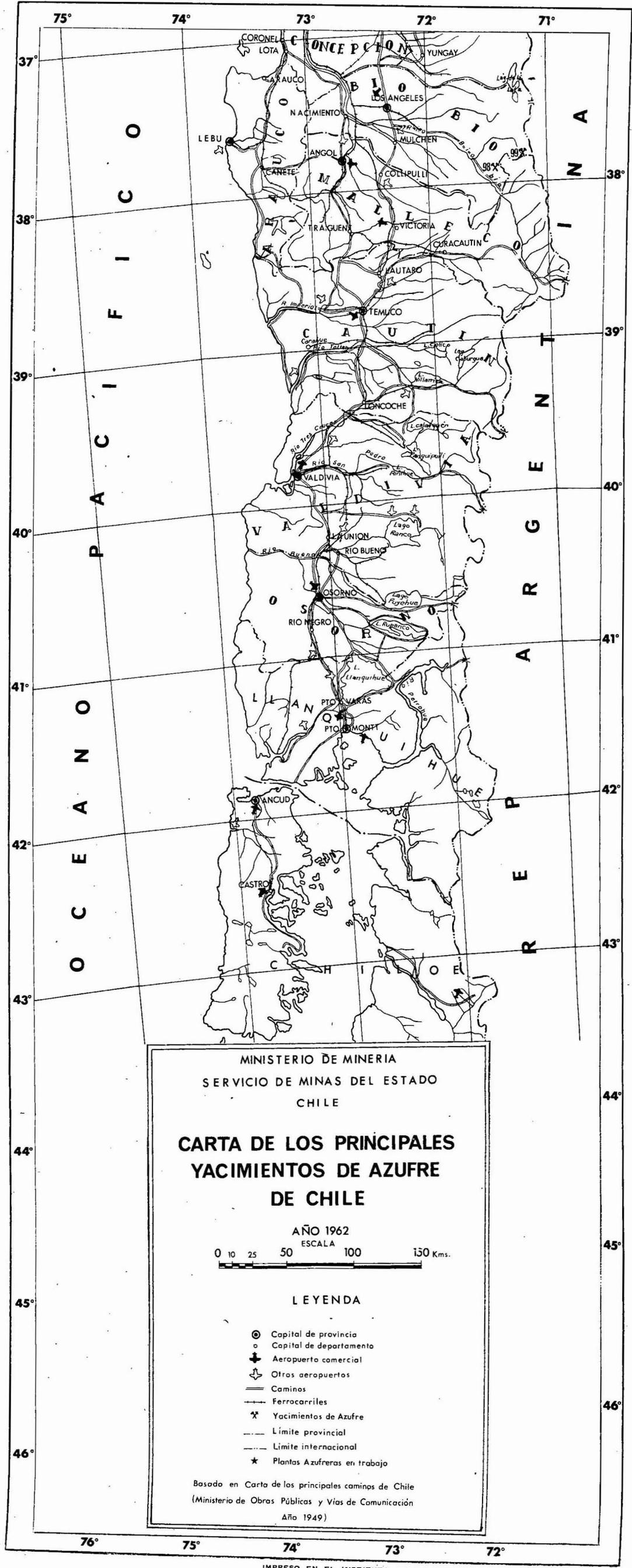


## BIBLIOGRAFIA

- 1 Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico — Alan M. Bateman.
- 2 Mineral Yearbook - 1958 - 1959 - 1960 — Bureau of Mines United States. Department of the Interior.
- 3 The Sulphur Export Corporation — SULEXCO — United States.
- 4 Sulphur Manual — Texas Gulf Sulphur Co.
- 5 Sulphur — Agosto 1961.
- 6 The Stone that Burns — 1942 — Williams Haynes.
- 7 World Sulphur Resources — Graham Oldham.
- 8 Mineral Information Service — Mayo-1-1938.
- 9 Sulphur an essential to industry and agriculture.
- 10 Engineering and Mining Journal — Enero 1960.
- 11 World Mining — Nov. 1959 — Sicilian Sulphur Miners Seek, New Methods to stay competitive - Luigi Usoni and Charles Will Wright.
- 12 World Mining — Mayo 1953 — New Sulphur refining process.
- 13 Mining World - Octubre 1954 - How high can mining go? — H. R. Cooke
- 14 Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería — Chile — Varios artículos.
- 15 World Mining — Julio 1961 — Nuevo solvente del azufre — F. Dale Huiller and C. J. Lewis.
- 16 La Industria azufrera mundial — Roberto H. Ridway.
- 17 Estudio económico sobre la industria del azufre en Chile — Santiago Macchiavello Varas.
- 18 El Azufre — Dr. Erch Thieler.
- 19 La industria del azufre — Tomás Vila.
- 20 Sulphur resource of Chile — H. C. Officer.
- 21 Estudio sobre la extracción del azufre de sus minerales por medio de autoclaves — Dr. Pablo Krassa y Moisés Silbermann.
- 22 Reservas del azufre de la región Ollagüe, Collahuasi - Benjamín Leiding.
- 23 Informe sobre las azufreras Tacora — Benjamín Leiding.
- 24 Informe sobre azufreras Manto Coloso — Héctor Flores W.
- 25 Yacimiento de azufre Purico — Max Flores A.
- 26 Estudio sobre varios yacimientos de azufre — Marín Rodríguez D.
- 27 Informes inéditos sobre numerosos yacimientos de azufre de Chile — Varios Ingenieros de Minas.
- 28 Experiencias de azufre con autoclave japonés — Corporación de Fomento de la Producción — Chile.
- 29 Anuario de la Minería de Chile — Servicio de Minas del Estado — Chile.
- 30 Datos proporcionados por las Empresas productoras de azufre de Chile.







**MINISTERIO DE MINERIA**  
**SERVICIO DE MINAS DEL ESTADO**  
**CHILE**

**CARTA DE LOS PRINCIPALES**  
**YACIMIENTOS DE AZUFRE**  
**DE CHILE**

AÑO 1962  
 ESCALA 1:50,000

0 10 25 50 100 150 Kms.

**LEYENDA**

- ⊙ Capital de provincia
- Capital de departamento
- ✚ Aeropuerto comercial
- ✚ Otros aeropuertos
- Caminos
- Ferrocarriles
- ✕ Yacimientos de Azufre
- - - Límite provincial
- - - Límite internacional
- ★ Plantas Azufreras en trabajo

Basado en Carta de los principales caminos de Chile  
 (Ministerio de Obras Públicas y Vías de Comunicación  
 Año 1949)