

**SEGEMAR**

SERVICIO GEOLÓGICO  
MINERO ARGENTINO

INTEMIN-INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA  
IGRM-INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

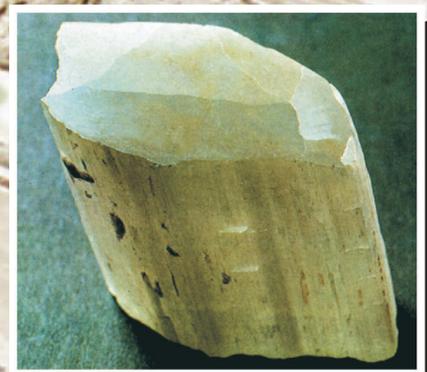
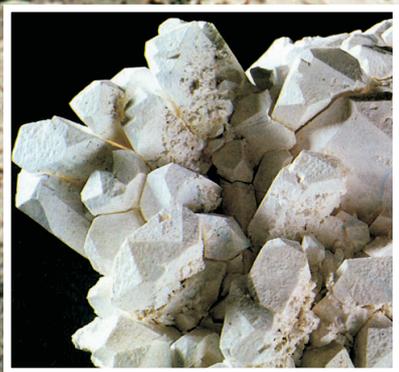
**U N S A M**

UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE GENERAL SAN MARTÍN

SEMINARIO DE ESTUDIOS SOBRE EL CICLO MINERALES - MATERIALES



# BORATOS



**SEGEMAR**

SERVICIO GEOLÓGICO  
MINERO ARGENTINO

INTEMIN-INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA  
IGRM-INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

**U N S A M**

UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE GENERAL SAN MARTÍN

---

SEMINARIO DE ESTUDIOS SOBRE EL CICLO MINERALES - MATERIALES

---

# BORATOS

**SEGEMAR**

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO  
SUBSECRETARÍA DE MINERÍA  
SECRETARÍA DE ENERGÍA Y MINERÍA  
MINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA Y VIVIENDA

Avda. General Paz entre Albarelos y Constituyentes

C.C. 327 - (1650) San Martín

Prov. de Buenos Aires - Argentina

TEL. 5411-4754-9232/36 - TEL. y FAX 5411-4754-4070

e-mail - Postmaster: [info@segemar.gov.ar](mailto:info@segemar.gov.ar)

Oficina Centro: Avda. Gral. Julio A. Roca 651 - Piso 2 - (1322) - Buenos Aires

TEL. 5411-4349-3127/3257 - TEL. y FAX 5411-4349-3129

**UNSAM**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN

Calle 78 (ex Alem) N° 3901

(1653) Villa Ballester - Provincia de Buenos Aires - ARGENTINA

TEL. y FAX 4767-5675/4738-4037/4847-1582

Fotos de tapa:

*Fondo: Mina de boratos Tincalayu, Salta. Vista general del open pit.*

*Arriba: Materiales elaborados con vidrio borosilicatado*

*Abajo izquierda: Tincalconita. California, Estados Unidos*

*Abajo derecha: Ulexita. Nevada, Estados Unidos*

ISSN N°: 0329-5230

## PRESENTACIÓN

Dentro del Convenio Marco de Cooperación firmado el 14 de agosto de 1996 entre la UNSAM - UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN y el SEGEMAR - SERVICIO GEOLOGICO MINERO ARGENTINO, se acordó, por el Acta Complementaria N° 1, la realización conjunta de un Seminario de Estudios sobre el tema: “*EL CICLO MINERALES - MATERIALES: TENDENCIAS A NIVEL MUNDIAL Y PROSPECTIVA PARA ARGENTINA*”. El objetivo de este Seminario es el de analizar las tendencias mundiales en la evolución tecnológica del ciclo:

- exploración geológica
- explotación minera
- procesamiento de minerales
- fabricación de materiales
- reciclado
- y la situación y prospectiva de nuestro país en el área de los materiales inorgánicos, tanto tradicionales como avanzados.

Las tareas de este Seminario son desarrolladas a través de dos de los institutos del SEGEMAR: el IGRM - INSTITUTO DE GEOLOGIA Y RECURSOS MINERALES, y el INTEMIN - INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA.

De esta manera ambas instituciones, el SEGEMAR y la UNSAM, buscan aunar recursos humanos y financieros para abordar la problemática del ciclo minerales - materiales, de fundamental importancia para el desarrollo tecnológico de nuestro país, a través de la investigación sobre tendencias a nivel mundial, información sobre recursos minerales, procesamiento de los mismos y fabricación de los productos finales - los materiales - sin olvidar aspectos tan relevantes como el reciclado, la salubridad y el medio ambiente. En efecto, la denominada “revolución de los materiales”, por su significación económica y estratégica, es una de las características tecnológicas más salientes del mundo de fines del siglo XX y comienzos del XXI, y nuestro país debe incorporarse en forma plena, a través de distintas vías, a la misma.

Los productos finales del Seminario serán publicaciones como la presente, que quedarán a disposición de las empresas industriales, de los organismos públicos y de los institutos de investigación, así como los archivos de la documentación básica utilizada. Toda sugerencia, aporte, crítica o comentario que sirvan para mejorar estas publicaciones serán bienvenidos.

*Ing. Jorge Mayoral*  
**Secretario de Minería de la Nación**  
Presidente SEGEMAR

*Lic. Daniel Malcolm*  
**Rector**  
UNSAM

# ***SEMINARIO DE ESTUDIOS SOBRE EL CICLO MINERALES - MATERIALES***

## ***GRUPO DE TRABAJO***

### **RECURSOS MINERALES**

**Coordinador del tema** *Dr. Eduardo O. Zappettini (IGRM)*  
*Lic. Lidia Inés Korzeniewski (Becaria UNSAM)*  
*Oswaldo Daniel Caccaglio (Becario UNSAM)*

### **PROCESAMIENTO Y RECICLADO**

**Coordinador del tema:** *Lic. Ana María Celeda (INTEMIN)*  
*Lic. Martín G. Labarca (Becario UNSAM)*

### **MATERIALES**

**Coordinador del tema:** *Ing. Andrés E. Pinto (INTEMIN)*  
*Lic. Martín G. Labarca (Becario UNSAM)*

### **INFORMACIÓN ECONÓMICA**

**Coordinador del tema** *Dr. Eduardo O. Zappettini (IGRM)*  
*Oswaldo Daniel Caccaglio (Becario UNSAM)*

### **DISEÑO PUBLICACIÓN**

**Coordinador del tema:** *Oswaldo Daniel Caccaglio (Becario UNSAM)*

### **COMITÉ ASESOR**

*Ing. Carlos Gianella (UNSAM)*  
*Lic. Juan Carlos Herrero (INTEMIN)*  
*Lic. Roberto Page (IGRM)*

## ÍNDICE

<b>Introducción</b>	9
<b>Capítulo 1: Yacimientos portadores de boratos en la República Argentina</b>	
1.1. Generalidades	11
1.2. Estado natural	11
1.3. Genesis de boratos	12
1.4. Los boratos en el mundo	14
1.5. Los boratos en la República Argentina	15
1.5.1. Yacimientos terciarios	15
1.5.2. Yacimientos cuaternarios	16
1.6. Sistemas de explotación	16
1.7. Bibliografía	25
<b>Capítulo 2: Procesamiento de minerales portadores de boro</b>	
2.1. Generalidades	27
2.2. Procesos de purificación	27
2.3. Obtención de concentrados de boratos por vía seca	27
2.3.1. Eliminación de impurezas	28
2.3.2. Separación de boratos entre sí	30
2.4. Obtención de concentrados de boratos por vía húmeda	32
2.4.1. Boratos solubles	32
2.4.2. Boratos insolubles	32
2.4.3. Separación de boratos entre sí	34
2.5. Procesos de obtención de productos primarios o intermedios	35
2.5.1. Bórax deca y pentahidratado	35
2.5.2. Ácido bórico	36
2.5.3. Óxido de boro	37
2.5.4. Bórax anhidro	37
2.5.5. Tricloruro de boro	38
2.6. Boruros metálicos y aleaciones de boro	38
2.7. Sales y soluciones acuosas de boratos	39
2.7.1. Boratos de metales alcalinos y de amonio	39
2.7.2. Otros boratos metálicos	40
2.7.3. Fosfato de boro	40
2.8. Toxicología y salud	40
2.9. Bibliografía	41
<b>Capítulo 3: Materiales y productos químicos a base de boro</b>	
3.1. Aplicaciones y características generales	43
3.2. Compuestos oxídicos de boro	43
3.3. Productos químicos a base de boratos	45

3.3.1.	Boratos de sodio .....	45
3.3.2.	Boratos de amonio y de potasio .....	46
3.3.3.	Boratos de calcio .....	46
3.3.4.	Otros boratos metálicos .....	47
3.4.	Materiales a base de compuestos no oxídicos .....	47
3.5.	Aleaciones hierro - boro .....	49
3.6.	Fosfato de boro .....	51
3.7.	Bibliografía .....	51

#### **Capítulo 4: Información económica de los boratos**

4.1.	Producción y consumo .....	52
4.2.	Producción en la República Argentina.....	53
4.3.	Política Arancelaria .....	54
4.4.	Comercio exterior .....	54
4.4.1.	Exportación .....	54
4.4.2.	Importación .....	55
4.5.	Consumo aparente .....	55
4.6.	Precios .....	56
4.6.1.	Precios internos .....	56
4.6.2.	Precios internacionales .....	56
4.7.	Usos y especificaciones .....	56
4.8.	Mercados y tendencias .....	57
4.9.	Bibliografía .....	57

## INTRODUCCIÓN

*“Para el año 2000 la tecnología que más influirá en otras ramas de la ingeniería será la tecnología de los materiales. Esta tecnología será también la que tendrá la repercusión externa más positiva en la industria, la energía, la vivienda, el transporte, la salud y otras esferas”.*

*Boletín ONUDI, Octubre 1995.*

Hay consenso general en que la llamada “revolución de los materiales” representa un hecho sumamente importante en la evolución actual de la sociedad mundial. Los materiales (metálicos, cerámicos, plásticos y compuestos) se fabrican con materias primas minerales, tanto inorgánicas como orgánicas. A su vez esos materiales, cumplido su **ciclo de vida**, vuelven a dispersarse en el medio ambiente, contaminándolo, o bien son reciclados volviendo a incorporarse al ciclo productivo, enfoque que cobra cada vez más importancia en el mundo (ver gráfico adjunto). El tema de este Seminario de Estudios sobre el Ciclo Minerales - Materiales es justamente analizar la situación de nuestro país en tal contexto, y en particular con respecto a las **materias primas minerales**: existen en gran variedad y muchas de ellas en abundancia, pero faltan más trabajos de exploración y relevamiento. En el otro extremo del ciclo, en particular en el caso de los **materiales avanzados**, su desarrollo se lleva a cabo mayormente en otros países, utilizando materias primas minerales procesadas de acuerdo a normas estrictas lo que significa un mucho mayor valor agregado a los productos de la minería. Pero en realidad, la actividad minera y la fabricación y uso de materiales forman parte del mismo ciclo, que se completa con los procesos de reciclado naturales y los realizados por el hombre, o la dispersión final en el medio ambiente: es el denominado **ciclo minerales - materiales**. Los estudios desarrollados en este Seminario conjunto entre el SEGEMAR y la UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN buscan ser un aporte a la comprensión de esta problemática.

La presente publicación recopila en forma ordenada la información de diversas fuentes sobre aspectos del ciclo del **boro**. En este volumen se compilan datos sobre los **boratos**, sus yacimientos en Argentina, procesamiento, obtención de materiales a partir de éstos, información económica y estadística como así también mercados y tendencias tecnológicas.

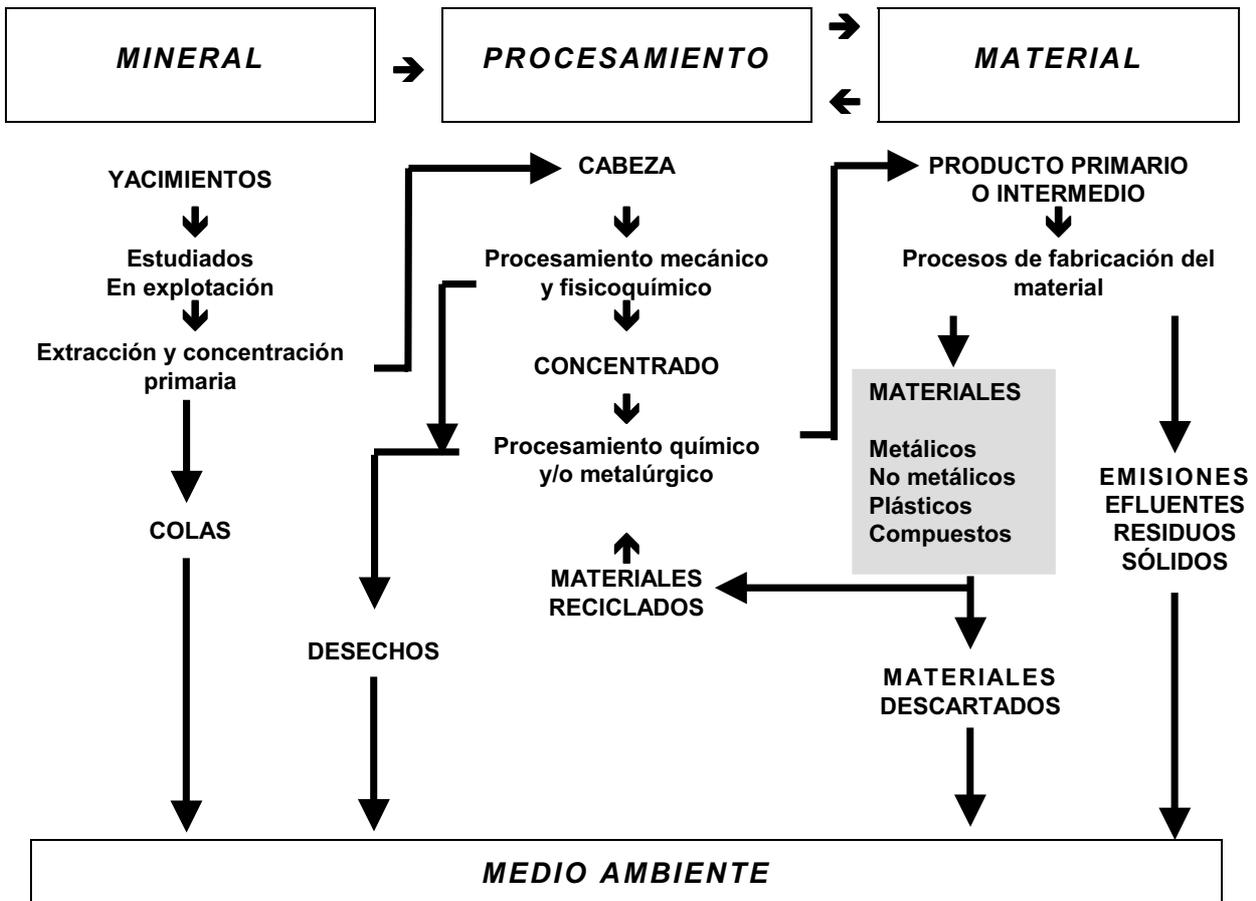
El boro ha sido desde siempre esencial para la vida y hoy en día, esencial en el estilo de vida moderno. Además, las plantas lo necesitan para crecer y es parte de la salud y la dieta humana.

Desde la primera vez que se utilizó un borato en China en el siglo X en la fabricación de vidrios cerámicos, hoy se sabe que su uso en la industria cerámica puede reducir el consumo energético durante la cocción. Las aplicaciones de los boratos son múltiples y, si bien las cinco principales aplicaciones industriales (fibras de vidrio, detergentes, vidrio y cerámica, agricultura: micronutrientes) toman casi el 75% de la producción mundial, las demás aplicaciones son tan variadas que los boratos se convierten en un mineral industrial “intrigante”. Existen más de 200 minerales portadores de boro, distribuidos en todo el planeta, no obstante lo cual no más de cinco son explotados industrialmente, encontrándose concentrados en muy pocas localidades, y su comercialización en el mercado mundial es dominada por dos grandes empresas productoras.

Pese a los millones de toneladas de boratos industrialmente extraídos, procesados y comercializados en el año las mayores cantidades de boro se transfieren alrededor del planeta por la naturaleza: lluvias, actividad volcánica y otros fenómenos atmosféricos que mueven al menos dos veces más boro que todas las prácticas industriales combinadas.

Esta serie de publicaciones ofrece a los interesados en el tema - empresas productoras de materias primas minerales o de productos intermedios o finales, usuarios de los materiales o de los componentes con

## ESQUEMA DEL CICLO MINERALES - MATERIALES



ellos fabricados, así como organismos públicos e instituciones universitarias y del sector científico-técnico - un conjunto articulado de informaciones que buscan satisfacer tanto un criterio de demanda (búsqueda de materias primas de origen mineral aptas para la fabricación de materiales tradicionales, avanzados, u otros productos), como de oferta e identificación de materias primas minerales de alto valor que existen en nuestro país y que no estén siendo explotadas, y que podrían ser ofrecidas (a mercados internos o externos) con algún tipo de elaboración que satisfaga los crecientes requerimientos de calidad. Estos trabajos muestran la necesidad de integración de las diversas disciplinas que tienen que ver con el estudio y desarrollo de todos los aspectos del **ciclo de los minerales - materiales**, tanto a nivel nacional como provincial, y la de un reforzamiento de las mismas especialmente en cuanto se refiere a los recursos humanos. Aprovechamos esta oportunidad para agradecer a todas las personas cuya colaboración ha sido de importancia para la concreción de esta tarea, desde los funcionarios responsables de nuestros organismos hasta nuestros colaboradores más inmediatos, y las numerosas personas que nos han ayudado en la recopilación de información.

En esta publicación, debemos agradecer especialmente la colaboración del Lic Carlos Solier, del área de vidrios del INTEMIN. Agradecemos asimismo de antemano a quienes nos señalen errores o imprecisiones en los textos para introducir, en las próximas ediciones de estos fascículos, las correcciones correspondientes.

Ana María Celeda  
Coordinadora de Procesamiento y Reciclado

# Capítulo 1

## YACIMIENTOS PORTADORES DE BORATOS EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

### 1.1. GENERALIDADES

Los boratos constituyen la principal fuente natural del elemento boro. Son “sales o ésteres de ácido bórico, los cuales contienen el radical  $B_2O_3$ ”.

El boro, número atómico 5, es el primer elemento del grupo IIIA de la tabla periódica. Los átomos de boro presentan propiedades semimetálicas, que se evidencian en una muy leve conductividad eléctrica, la cual es mayor con el aumento de temperatura, comportamiento opuesto al de los metales. Además, presentan propiedades químicas análogas a los silicatos, al formar fuertes uniones covalentes boro-oxígeno. Los boratos forman grupos polimerizados en cadenas, capas y grupos múltiples aislados. Esto se debe a que el ion boro trivalente, de tamaño muy pequeño, está unido a tres oxígenos en su coordinación más estable. La mayoría de los boratos corrientes están formados por dos capas de triángulos de  $BO_3$  en los que todos los oxígenos están compartidos, dichas capas están separadas por moléculas de agua y unidas unas con otras por iones sodio y calcio (Hurlbut, 1980).

El boro es el único elemento liviano que posee 2 isótopos abundantes,  $B^{10}$  y  $B^{11}$ . El isótopo  $B^{11}$  es utilizado para estudios sedimentológicos, petrogénicos, etc., ya que los minerales tienden a enriquecerse sólo en este isótopo, encontrándose también en los vapores de géisers y/o fumarolas (Wedepohl, 1978). El isótopo  $B^{10}$  tiene aplicaciones en medicina, como por ejemplo en microcirugía (Barth et al., 1990, en Kistler and Helvacı, 1994)

La concentración promedio del boro en la corteza terrestre es baja no superando las 10 ppm (Wedepohl, 1978). Los suelos y rocas tienen concentraciones cercanas a las 450 ppm, distribuidos principalmente en sales de sodio, calcio y magnesio. En las aguas continentales es cercana a 0,1 ppm y en los océanos es de 4,6 ppm (Sprague, 1972, en Kistler and Helvacı, 1994).

Las concentraciones económicas de boratos se encuentran limitadas a salares, salmueras y *skarns*. Los salares son los yacimientos en el ámbito mundial con mayor concentración de boratos como también los de más simple explotación.

### 1.2. ESTADO NATURAL

El grupo de los boratos comprende más de 100 especies minerales, de las cuales sólo cuatro son las más abundantes: bórax, kernita, ulexita y colemanita. Por constituir concentraciones de interés económico en la Argentina se agregan la hidroboracita e inyoíta.

**BORAX** (*Tincal*)  $Na_2[B_4O_5(OH)_4] \cdot 8H_2O$ . Cristaliza en el sistema monoclinico con habito prismático. De fractura concoidea y dureza Mohs de 2-2,5 y densidad de 1,7-1,8  $g \cdot cm^{-3}$ . Transparente a translúcido y brillo vítreo. Incoloro, gris o amarillento. Por deshidratación se altera a tincalconita.

**KERNITA**  $Na_2[B_4O_6(OH)_2] \cdot 3H_2O$ . Al igual que el bórax pertenece al sistema monoclinico, de habito tabular a fibroso. Se encuentra generalmente en forma de agregados exfoliables. Es incoloro a blanco con brillo vítreo a perlado. Tiene dureza Mohs 3 y densidad 1,95  $g \cdot cm^{-3}$ . Se origina por la deshidratación del bórax en ambientes metamórficos. Con un mayor contenido de  $B_2O_3$  que el bórax pero su disolución en agua es más lenta. Al igual que el bórax se altera a tincalconita.

**ULEXITA**  $NaCa[B_5O_6(OH)_6] \cdot 5H_2O$ . Cristaliza en el sistema triclinico en cristales muy pequeños de hábito acicular como fibras muy delgadas. Tiene dureza Mohs 1 y densidad 1,7-1,9  $g \cdot cm^{-3}$ . Es de color blanco con brillo sedoso o mate. Generalmente contaminado con cloruro de sodio y otras sales. Es menos soluble en agua que otras

variedades de boratos. La ulexita tiene dos formas de ocurrencia, en agregados globosos, sueltos y blancos denominado “papas” o “bolas de algodón” (*cotton balls*) y como mineral masivo llamada “barra” o “planchas”. La ulexita también es llamada boronatrocalcita y la variedad deshidratada se denomina probertita.

**COLEMANITA**  $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  Monoclínico con hábito prismático corto y se presenta en masas exfoliables, granular y compacto. Tiene dureza Mohs 4,5 y densidad  $2,42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Es incolora a blanca con brillo vítreo, transparente a translúcido. Generalmente está asociada a la ulexita y puede ser tanto primaria como secundaria (Alonso, 1999 a). Tiene una baja solubilidad en agua por lo cual es preferentemente disuelta en ácidos.

**HIDROBORACITA**  $\text{CaMg}[\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3]_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Monoclínico, en masas aciculares o fibrosas divergentes. Tiene dureza Mohs 2 y densidad  $1,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Translúcido y de brillo

vítreo. Se presenta como un mineral de coloraciones claras cuando es puro y con tonalidades verdosas o rosadas a causa de contener ganga tuftica o yesosa. También son frecuentes las coloraciones amarillentas a causa de sulfuros de arsénico. (Alonso, 1999 a).

**INYOITA**  $\text{Ca}[\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_5]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Monoclínico, de hábito tabular. Es un mineral frágil con fractura irregular, de dureza Mohs 2 y densidad  $1,87 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . De brillo vítreo, incoloro y translúcido, a veces con tonalidades amarillentas a causa de arsénico u óxido de hierro. Se presenta en forma de geodas, drusas o venillas.

En la República Argentina se descubrieron nuevas especies minerales de boratos, estas son: ameghinita, aristarainita, ezcurrita, rivadavita, searlesita, teruggita (Angelelli et al., 1983). Estos minerales son considerados rarezas mineralógicas y no forman concentraciones importantes.

Principales minerales del grupo de los boratos		
Mineral	Formula Empírica	% $\text{B}_2\text{O}_3$
Sassolita	$\text{B}(\text{OH})_3$ o $\text{B}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	56,4
Bórax (Tincal)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\cdot \text{H}_2\text{O}$	36,5
Tincalconita	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 5\cdot \text{H}_2\text{O}$	48,8
Kernita	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 4\cdot \text{H}_2\text{O}$	51,0
Ulexita	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	43,0
Probertita	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	49,6
Priceita	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	49,8
Inyoita	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 13\text{H}_2\text{O}$	37,6
Meyerhofferita	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	46,7
Colemanita	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	50,8
Hidroboracita	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50,5
Inderborita	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11}\cdot 11\text{H}_2\text{O}$	41,5
Kurnakovita	$\text{MgB}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$	37,3
Inderita	$\text{MgB}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$	37,3
Szaibelyta	$\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5\cdot \text{H}_2\text{O}$	41,4
Suanita	$\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$	46,3
Kotoita	$\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$	36,5
Pinnoita	$\text{MgB}_2\text{O}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	42,5
Boracita	$\text{MgB}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$	62,5
Datolita	$\text{Ca}_2\text{B}_2\text{Si}_2\text{O}_9\cdot \text{H}_2\text{O}$	21,8
Cahnita	$\text{Ca}_2\text{AsBO}_6\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	11,7
Danburita	$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	28,3
Howlita	$\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{B}_{10}\text{O}_{23}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	44,5
Vonsenita (Paigeita)	$(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{FeBO}_5$	10,3
Ludwigita	$(\text{Fe},\text{Mg})_4\text{Fe}_2\text{B}_2\text{O}_7$	17,8
Tunellita	$\text{SrB}_6\text{O}_{10}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	52,9

Mineral	Yacimiento	Formula Empírica	% $\text{B}_2\text{O}_3$
Ameghinita	Tincalayu	$\text{Na}_2[\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_4]_2$	59,3
Aristarainita	Tincalayu	$\text{Na}_2\text{Mg}[\text{B}_{12}\text{O}_{20}]10\text{H}_2\text{O}$	59,5
Ezcurrita	Tincalayu	$\text{Na}_2[\text{B}_5\text{O}_7(\text{OH})_2]_2\text{H}_2\text{O}$	58,5
Macallisterita	Tincalayu	$\text{Mg}[\text{B}_6\text{O}_7(\text{OH})_6]_4\text{H}_2\text{O}$	56,6
Rivadavita	Tincalayu	$\text{Na}_6\text{Mg}[\text{B}_6\text{O}_7(\text{OH})_6]_410\text{H}_2\text{O}$	58,2
Searlesita	Tincalayu	$\text{NaB}[\text{Si}_2\text{O}_6]\text{H}_2\text{O}$	16,9
Teruggita	L. Blanca	$\text{Ca}_4\text{Mg}[\text{AsB}_6\text{O}_{11}(\text{OH})_6]_214\text{H}_2\text{O}$	32,8

### 1.3. GENESIS DE BORATOS

Los boratos ocurren en diferentes tipos de depósitos asociados a evaporitas continentales, evaporitas marinas y cuerpos magmáticos. De todos estos los más importantes económicamente son los depósitos evaporíticos continentales, los cuales están relacionados a sedimentos continentales y vulcanismo de edad neógena a actual. Las evaporitas marinas son el producto de evaporación de agua de mar en cuencas restringidas y los depósitos magmáticos están relacionados a cuerpos ígneos de composición granítica (Kistler and Helvacı, 1994).

En la Argentina sólo encontramos depósitos de boratos en evaporitas continentales y su génesis está relacionada con: un vulcanismo activo, cuencas endorreicas (hidrológicamente cerradas) y clima árido (seco).

La depositación de los boratos se produce por precipitación química-evaporítica a partir de

## Tipos de depósitos

DEPÓSITOS		MINERALES	PRINCIPALES YACIMIENTOS
Evaporitas Continentales	Salares, salinas, salmueras	Bórax, ulexita, kernita, inyoíta, colemanita, hidroboraquita	<u>Estados Unidos</u> : Boron, Searles Lake, Death Valley <u>Turquia</u> : Bigadic, Sultancayiri, Kestelek, Emet, Kirka <u>Argentina</u> : Tincalayu, Pastos Grandes <u>China</u> : Xizang (Tibet), Qinghai <u>Chile</u> : salar de Surire
Evaporitas marinas	Domos salinos	Szalbelyita, hidroboraquita	<u>Rusia</u> : Inder(guryev) Kazakhstan Este de Europa (Alemania)
Magmático	Pegmatitas, skarns asociados a intrusiones graníticas ácidas	Datolita, ludwigita, pigeita, turmalina	<u>Rusia</u> : Bor en Primorsk <u>China</u> : Liaoning

soluciones sobresaturadas en iones boro. El borato puede desarrollarse ya sea en la interfase agua-sedimento o bien en el interior del fango por crecimiento de evapocristales a partir de centros de nucleación ricos en iones boro. La potencia y calidad del depósito boratífero depende de varios factores, como ser el grado de aporte de las fuentes termales, tamaño, régimen, permanencia del cuerpo lacustre, grado de subsidencia, tasa de sedimentación y factores climáticos (Alonso y Viramonte, 1993).

Se reconocen dos tipos de depósitos boratíferos, el más extendido corresponde a aquellos que ocurren en capas mineralizadas como parte del relleno de salares, salinas y lagunas. El segundo tipo de depósitos yace alrededor de géisers o manantiales termales en áreas exteriores a los salares.

Los dos casos se relacionan con fuentes termales que alcanzaron la superficie por fracturas que limitan las cuencas de sedimentación. Es importante resaltar que las fracturas por donde ascendieron las soluciones ó aguas termales, denominadas estructuras de alimentación, son correlacionables en la mayoría de los casos a uno de los flancos o borde de los salares.

Las aguas termales alcanzan la superficie con una alta concentración de gases y elevada temperatura. El contacto con la atmósfera produce la pérdida de gases como también un enfriamiento rápido. El ácido bórico reacciona con los cationes presentes y da lugar a la formación de boratos. Si el sitio donde alcanza

la superficie es seco se forman depósitos macizos en los alrededores de la fuente, en cambio si en el lugar existe un cuerpo de agua, las soluciones se diluyen en éste. En un cuerpo de aguas efímero, la evaporación produce una pequeña capa o costra de boratos, cuyo espesor es función inversa al volumen del cuerpo (milimétrico, centimétrico). Si el cuerpo de agua es permanente, pueden ocurrir dos situaciones, comenzar una precipitación química debido a alcanzar la sobresaturación, formando un depósito en el fondo del lago o quedar en solución formando salmueras ricas en boro.

La secuencia de precipitación está controlada por la temperatura: primero precipita el travertino y luego los boratos. La relación existente entre la temperatura del agua y el contenido de boro, es que las aguas termales templadas (16°C) son las más enriquecidas (Argañaz y Nadir, 1979). En los salares Ratonés, Centenario, Diablillos y Cauchari, los depósitos de ulexita presentan una zonación concéntrica a partir del edificio travertínico. La zona más próxima a la boca termal esta formada por mineral masivo o "barra" y hacia posiciones distales yacen las "papas", primero de tamaños grandes (15 a 20 cm) para disminuir gradualmente hasta alcanzar dos o tres centímetros. Finalmente aparece el mineral diseminado en forma de agujas (Alonso y Gutiérrez, 1984).

Como minerales de ganga aparecen yeso, halita, tenardita y subordinadamente, calcita, baritina y celestina. Los sulfuros de arsénico

(rejalgar y oropimente) son frecuentes; aparecen como intercrecimientos amarillos o naranjas en el bórax, en ocasiones en concentraciones elevadas (Alonso, 1999 a).

#### 1.4. LOS BORATOS EN EL MUNDO

La producción de boratos se limita a una decena de países. El mayor productor mundial es Turquía seguido por Estados Unidos y Rusia, los que, en conjunto, proporcionan más del 90% del consumo mundial.

**TURQUÍA.** Los depósitos de boratos están ubicados al oeste en la región conocida como Anatolia, abarcando un área de 300 km en dirección este-oeste y 150 km norte-sur. Los principales distritos boratíferos son Bigadic, Kirka, Kestelet, y Emet. El distrito de Bigadic representa el mayor depósito mundial de colemanita y ulexita hasta hoy conocido (Helvacı, 1989, en Kistler and Helvacı, 1994) mientras que Kirka, de edad neógena, es el único distrito en Turquía que contiene boratos sódicos (bórax y kernita). El cuerpo mineralizado tiene un espesor mayor a los 145 m con un promedio del 20-25%  $B_2O_3$  con reservas mayores a 100 Mt (Wendel, 1978, en Kistler and Helvacı, 1994).

**ESTADOS UNIDOS.** Comenzó la explotación de boratos en 1864 en el estado de California. En la actualidad la explotación se realiza en tres localidades: Boron (Kramer), Searles Lake y en menor extensión Death Valley. Boron es un depósito lenticular de bórax, kernita y ulexita. Cubre una superficie de 1.3 km<sup>2</sup> y posee aproximadamente 100 m de espesor, presentando reservas por 140 Mt (Norman, 1991, en Kistler and Helvacı, 1994). Searles Lake está formado por dos horizontes mineralizados de bórax, con arcillas, carbonato de sodio y salmueras intersticiales. El espesor promedio de los horizontes es de 15 m y 12 m, en una superficie de 103 km<sup>2</sup> con un contenido promedio del 1.1%  $B_2O_3$ . El yacimiento se explota por un sistema de pozos de bombeo, donde cada uno de los horizontes es tratado por separado. Por último los depósitos de Death Valley son explotados por métodos subterráneos en los cuales la mineralización principal es de colemanita-ulexita con un promedio del 18 al 24%  $B_2O_3$

(MacAllister, 1970, en Kistler and Helvacı, 1994).

**CHINA.** Los boratos se explotan en las provincias de Liaoning, Qinghai y Xigang. Los depósitos de Liaoning están constituidos por boratos de magnesio distribuidos en 112 depósitos de los cuales 12 contienen el 98% de las reservas, con un contenido promedio de 5 al 18%  $B_2O_3$ . En Qinghai los depósitos de boratos (ulexita, pinnoita, hidroboracita y bórax) contienen salmueras mineralizadas con boro, litio y potasio (Kistler and Helvacı, 1994).

**RUSIA.** A partir de la década del 90, el 95% de la producción proviene del yacimiento Bor en Dalneregorsk en las cercanías del mar del Japón donde se explota un *skarn* borosilicático con un contenido de 8-10%  $B_2O_3$  (Kistler and Helvacı, 1994).

**CHILE.** Los yacimientos más importantes son el salar de Surire, Ascotán, y las salmueras boratíferas del salar de Atacama y con menor importancia los de Aguas Calientes Norte, Quisquiró y Aguas Calientes Sur. Los yacimientos se ubican, geográficamente, en el sector norte de Chile, en las actuales Regiones de Tarapacá y Antofagasta. El único mineral explotado es la ulexita, a la que se asocia inyoíta, bórax y colemanita. El salar de Surire se ubica a 135 km de la ciudad de Arica, con una superficie de 120 km<sup>2</sup>, presentando leyes que varían entre 8 y 36% de  $B_2O_3$  (Chong et al., 2000)

El salar de Atacama tiene salmueras, enriquecidas en litio, potasio y boratos. Los boratos constituyen un subproducto comercial de la explotación de litio y potasio. Las reservas son del orden de 10 millones de toneladas de  $B_2O_3$  (Garrett, 1998, en Chong et al., 2000).

**PERÚ.** Laguna Salinas es el único yacimiento de boratos del Perú, ubicado en la región sur del país, en el Departamento de Arequipa. Este yacimiento tiene una mineralización de ulexita y en menor proporción inyoíta, con un espesor promedio de 0,75 m con un 27% de  $B_2O_3$ . Las reservas alcanzan las 29,4 Mt en base húmeda (Alonso, 1996).

Además existen depósitos en India, Italia, Corea del Norte, México, Yugoslavia, Grecia y Bolivia.

## 1.5. LOS BORATOS EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

La primer referencia de boratos en la República Argentina es hacia el 1700, cuando los jesuitas los utilizaron, para el beneficio de metales preciosos (Alonso y Viramonte, 1985).

Catalano, (1926, 1927, 1964) realizó investigaciones de la mayoría de los salares, con menciones de los depósitos del salar del Hombre Muerto, Pastos Grandes y Cauchari. Más recientemente Argarañaz y Nadir (1979), Alonso y Viramonte (1993) y Alonso (1999 a, 1999 b, y 1996) analizaron la génesis y mineralogía de los diferentes depósitos.

Los depósitos de boratos están localizados en la Puna, que forma parte de los Andes Centrales. Esta región abarca unos 100.000 km<sup>2</sup> del noroeste del territorio argentino, con una elevación promedio de 3.700 m.s.n.m. y ocupa parte del occidente de las provincias de Jujuy, Salta y el límite norte de Catamarca. Es una región desértica con un paisaje dominado por planicies aluviales, salinas e importantes estratovolcanes. El relleno de los salares comprende evaporitas (halita, yeso y boratos), material clástico aluvial y depósitos tobáceos.

Los boratos son los minerales no metalíferos más explotados en el noroeste argentino, con el mejor rendimiento económico; principal fuente de ingreso de divisas por exportación. La explotación ocupa el primer lugar dentro de la actividad minera de la región. Las reservas de boratos en salares en la Puna superan los 30 millones de toneladas considerando solo el relleno superficial por no tenerse información del substrato. La mayoría de los salares de la Puna tienen ulexita en concentraciones económicas y con buen grado de pureza (Alonso, 1999 a).

Los depósitos de boratos presentan edades terciarias (Mioceno - Plioceno) y cuaternarias (Pleistoceno - Actual). Los yacimientos terciarios se distinguen de los actuales por su mineralogía y estructura. Los minerales kernita, hidroboracita y colemanita sólo se encuentran en los primeros y en cuanto a la estructura de los yacimientos, presentan fallamiento y plegamiento.

Los principales yacimientos de boratos terciarios de la provincia de Salta son Tincalayu y Sijes y en la provincia de Jujuy, Loma Blanca. Tincalayu y Loma Blanca representan dos de los cuatro únicos yacimientos de bórax del mundo

junto a Boron en California y Kirka en Turquía. Manifestaciones menores afloran sobre el borde oriental de los salares Cauchari y Antofalla y en la mina Narciso al oeste de Coranzulí.

En referencia a los yacimientos cuaternarios de boratos existen depósitos como relleno de las actuales depresiones y como capas de boratos depositadas alrededor de géisers y fumarolas.

Los mayores yacimientos cuaternarios de boratos se encuentran en el salar del Hombre Muerto, Cauchari y Diablillos. Otros salares con depósitos son: Ratones, Centenario, Pozuelos, Pastos Grandes, Rincón, Olaroz, Turi Lari, Jama, Salinas Grandes y Guayatayoc.

### 1.5.1. Yacimientos terciarios

El yacimiento Tincalayu está en el extremo noroeste del salar del Hombre Muerto y consiste en un cuerpo masivo de boratos, depositado sobre basamento salino y cubierto por estratos sedimentarios y vulcanitas. El depósito tiene forma de lente, deformada plásticamente por soterramiento y tectónica. La mineralización presenta una distribución irregular en función de la posición dentro del depósito. La mineralización consiste principalmente en bórax con proporciones variables de ganga y niveles interestratificados de clastitas castañas y toba verde. La facies boratífera principal es bórax y en menor proporción ulexita. El bórax ocurre como masas irregulares de mineral microgranular bandeado. En algunos horizontes basales llega a constituir casi el 80 % del total del espesor del banco, en tanto que hacia el techo y las márgenes del cuerpo mineralizado, ocurre solamente como mineral diseminado.

Las reservas de Tincalayu se estiman en 5,0 Mt de recurso con ley promedio 12 % de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El yacimiento es explotado a cielo abierto, por medio de un open pit, con banqueo regresivo y descendente. En la actualidad la producción es del orden de 100.000 t anuales. El yacimiento cuenta con una planta de beneficio para minerales por vía húmeda, donde se produce un concentrado de 28 % de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, para luego ser transportado a la localidad de Campo Quijano, donde se completa su procesamiento. Tanto la mina, como ambas plantas se encuentran en producción (Suim 2001/2002).

El Yacimiento Sijes se encuentra ubicado en el borde oriental de la depresión de Pastos

Grandes y son mantos interestratificados dentro de rocas clásticas, piroclásticas, evaporíticas. Los minerales predominantes por cantidad y calidad son: hidroboracita, colemanita, inyoíta y ulexita. La explotación del yacimiento se realiza a cielo abierto, por banqueo. La ley general del depósito alcanza el 19 % de  $B_2O_3$  y las reservas entre indicadas e inferidas alcanzan 13,5 Mt de  $B_2O_3$ . El yacimiento cuenta con una planta de beneficio que en la actualidad se encuentra en producción.

El yacimiento Loma Blanca se encuentra ubicado en Jujuy. Sus mineralizaciones están interestratificadas en la formación Sijes y consisten en bórax, ulexita e inyoíta. Las reservas inferidas son 12,7 Mt (Godeas et al., 1999).

### 1.5.2. Yacimientos cuaternarios

El Grupo Minero “La Inundada” se encuentra ubicado en la porción central y sur del salar de Cauchari, Departamento de Susques, Provincia de Jujuy. Está compuesto por las siguientes pertenencias mineras: La Inundada, Jujuy, Susques, La Inundada Este y Sud, totalizando una superficie de 536 hectáreas. Los depósitos boratíferos son de ulexita y bórax (tincal), asociados a sulfato de sodio y halita (cloruro de sodio). En la parte central y sur del salar se encuentran los principales depósitos de bórax, que presentan una amplia e irregular distribución tanto areal como en profundidad. Las reservas son estimadas en el orden de 1,3 millones de toneladas. La empresa que explota el depósito cuenta con una planta de beneficio ubicada en la localidad de Olacapato. En la actualidad, el yacimiento se encuentra en producción.

El Grupo Minero Santo Domingo se ubica en el borde sud oriental del salar de Diablillos en la provincia de Salta. El salar de Diablillos, es el único que presenta boratos en casi la totalidad de su superficie, sin observarse capas de halita. Esta falta de sal hace que el contenido global de cloruros sea bajo, lo cual beneficia la calidad final del borato extraído. La forma del cuerpo mineralizado, es de un depósito mantiforme, sedimentario singenético, que cubre gran parte de la pertenencia. El borato existente en el salar de Diablillos, corresponde mayormente a la clásica ulexita masiva, en cuerpos homogéneos

y macizos, monominerálicos, de distribución regular.

El Grupo Minero Maggie se ubica en la porción centro - sur del salar Centenario, en la provincia de Salta. Constituye un típico depósito evaporítico monomineral. De acuerdo al tipo de mineralización observada en los pozos de exploración y en los frentes de arranques, el Grupo Minero Maggie es un depósito mantiforme de ulexita, homogéneo y monomineral. La ulexita masiva representa el 85 % del total cubicado a la que se le asocia ulexita en “papa” subordinada (15%). Ambas variedades son de excelente calidad, la ley media es 28%  $B_2O_3$  y humedad natural del 12 al 30 %. El mineral de mena es la ulexita masiva (barra), de buena pureza y excelente calidad industrial, sobresale por su escaso contenido de insolubles (menor al 10 %). El espesor promedio de mineral es de 30 a 75 centímetros. La extracción de mineral se realiza a cielo abierto, con arranque manual o mecánico. El emprendimiento minero cuenta con una planta de concentración en el yacimiento y una planta de producción de ácido bórico en la localidad de Estación Alvarado, Prov. de Salta. Los productos elaborados por la empresa son: Acido Bórico 99.5 % de  $B_2O_3$ , Ulexita anhidra (Fritabor) 50 % de  $B_2O_3$  y Ulexita Molida. El Grupo Minero Maggie, se encuentra al momento en actividad.

## 1.6. SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN

Los depósitos de boratos en la Argentina se explotan a cielo abierto por diferentes métodos según sean de edad terciaria o cuaternaria. Los yacimientos terciarios se explotan por métodos de canteras, “open pit” o banqueo debido a la gran dimensión y forma de los cuerpos. Los yacimientos cuaternarios se explotan por métodos manuales (pico y pala) y/o mecánicos al ser depósitos superficiales, de poco espesor y con un encape menor al metro. Además, tienen un gran desarrollo areal pero con concentraciones económicas de boratos en forma errática.

El yacimiento de boratos de Sijes (terciario) se explota por método de banqueo. El depósito esta formado por mantos interestratificados en rocas sedimentarias, que varían lateralmente el tipo de boratos y la calidad del mismo. La extracción de estéril (descarpe) se realiza por medio de voladuras, el material extraído se

acumula en zonas de desmontes. La extracción de mineral económico, también se realiza por voladuras, con bancos de 3 a 5 metros, en niveles de por lo menos 15 metros. Una vez arrancado el mineral es transportado a playa donde se lo clasifica manualmente por tamaño y calidad. Los bloques con sobretamaño, se fracturan a mano (maza) o con voladura secundaria, el mineral seleccionado, es transportado a la planta de trituración y concentración. La recuperación estimada del método es de 70 % y la capacidad teórica de producción (1993) es de 8.800 t/año (Suim 2001/2002).

El yacimiento Tincalayu (terciario) es un cuerpo masivo de bórax cristalino, el cual es explotado por medio de un *open pit*, con banqueo regresivo y descendente. Las principales tareas de explotación son el retiro del material estéril, la extracción del mineral económico y trituración primaria.

Las dimensiones del open pit, para noviembre de 1980, eran del orden de los 500 x 400 m, 100 m de profundidad y niveles de 5-6 m de altura. El movimiento de material se lleva a cabo a través de grandes cargadores frontales y camiones. La producción del yacimiento es del orden de las 100.000 t anuales de mineral con ley 18 % de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mineral que sirve de alimentación a la planta de beneficio, ubicada en mina (Suim, 2001/2002).

El laboreo minero, en las explotaciones de

boratos cuaternarios, comienza con la extracción del encape que cubre el mineral de interés, el cual está compuesto por una costra o eflorescencia de composición salina. El material estéril es retirado del lugar por medio de carretillas (50 kg de capacidad). El primer secado se realiza de manera natural aprovechando las condiciones climáticas de la región (clima árido y seco), dentro del salar. El material se ubica en una pila de 50 kg donde por medio de una horquilla, el mineral es removido para un secado parejo. El tiempo de secado depende de la estación del año, con un promedio, para épocas invernales, de 15 a 20 días. Una vez seco el mineral es transportado por medio de volquetes de 4-5 toneladas a las playas de secado secundario y preparación ubicadas en las afueras del salar o en las plantas de beneficio.

Para obtener un óptimo secado secundario se procede a reducir el tamaño del mineral con el fin de tener una mayor superficie de exposición y realizar una nueva selección. Una vez reducido y seleccionado, el mineral se extiende cubriendo una superficie de 3 a 5 m de largo por un metro de ancho y 30 a 40 cm de alto durante 4 a 5 días. Una vez alcanzada la humedad técnica del 5 al 10% se redistribuye el mineral en pilas cónicas de 10 toneladas. Así, el mineral queda listo para ser embolsado y/o procesado (Battaglia y Alonso, 1992).

## PROVINCIA DE CATAMARCA

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>20 de Mayo, Don Elías, Despegue, Ricardo, Sin Nombre, Horacio, Eduardo</b>	Salar del Hombre Muerto	25° 25' S 67° 06' O	Ulexita	El encape está formado por eflorescencias y costras salinas. La ulexita ocurre en capas de unos pocos centímetros a un metro de espesor con predominio de "papas". Los boratos están intercalados con capas de arena, limos, arcillas o gipsarenita. Existe una tendencia a la estratificación de los niveles boratíferos. El sustrato de la capa boratífera está constituido por arcillas rojas o verdes en algunos casos féridas.	Alonso, 1999 b Godeas et al., 1999
<b>Salar de Antofalla</b>	Al oeste de la loc. Antofagasta de la Sierra	25° 45' S 67° 45' O	Ulexita	La ulexita se presenta en nódulos irregulares, diseminados, no mayores a los 5 cm de diámetro. El mineral se encuentra asociado a yeso, halita, arenas y arcillas	Alonso, 1999 b

## PROVINCIA DE JUJUY

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Grupo Minero La Inundada (La Inundada, Medanitos, Susques, Defensa, Jujuy; Nueva Siberia y otras)</b>	Salar de Cauchari, zona central y sur. Dep. Susques	23° 55' S 66° 47' O	Ulexita, bórax	Gran parte de la superficie del grupo minero se encuentra ocupada por cubierta travertínica, como en las minas La Inundada y Jujuy. Hacia el sector central del salar, donde se ubican las minas La Inundada este, Susques y La Inundada Sud, corresponde al sector topográficamente deprimido respecto al área travertínica. La mineralización en el área no es uniforme. En los materiales gruesos se encuentran los cristales más grandes y en la arcilla los más pequeños. Estos últimos más puros, con escaso porcentaje de ganga arenosa.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Boratera Vilama, Cerro Tinte</b>	Laguna Vilama	22° 33' S 66° 53' O	Ulexita	Las concentraciones de boratos se encuentran en el norte y sur de la laguna. El área norte es la más importante. La ulexita es el mineral que reviste interés y se lo encuentra como un borato de baja calidad.	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Edith (Boratera Coyaguaima)</b>	Distrito Coyaguaima. Dep. Rinconada	22° 47' S 66° 34' O	Ulexita, bórax	Cuerpos lentiformes, con una superficie de 3.800 m <sup>2</sup> , con un espesor máximo de 1,6 m, asociados a niveles travertínicos. El bórax se ubica en el borde oriental, en una capa de 0,20 m de espesor (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 30,7-41,3 %)	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Campamento 1<sup>o</sup> de Mayo</b>	Salar de Cauchari	24° 01' S 66° 49' O	Ulexita	El mineral se presenta en pequeños agregados fibrosos formando nódulos con escasa arcilla limosa rojiza. El depósito es un banco de 120 m de longitud en sentido N-S y 50-60 m de ancho, con espesores variables de 23 -10 cm (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 32,46 %).	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>El Porvenir</b>	Salar de Cauchari, sector centro-oeste. Dep. Susques	23° 51' S 66° 47' O	Ulexita, bórax, boracita, hidroboraquita, colemanita	El Porvenir es un manto de ulexita que yace hasta el metro de profundidad, en una matriz limo-arenosa. Las "papas" alcanzan los 40 cm de diámetro con una proporción del 70 %. El yacimiento presenta, además, un nivel inferior de ulexita en barra con participaciones menores de bórax, boracita, hidroboraquita y colemanita.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Grupo San Nicolás</b>	Sector centro oriental del Salar de Olaroz	sd	Ulexita	El depósito es un manto horizontal de 400 m de largo en dirección N-S, 250-300 m de ancho, con espesores máximos de 1,30 m. La ulexita se presenta en "papas" de 0,5 a 12 cm de diámetro (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 25,35 %).	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Loma Blanca</b>	10 km al O de Coranzulí. Dep. Susques	23° 03' S 66° 27' O	Inyoíta, bórax, ulexita, colemanita	El depósito, de edad terciaria, yace en tuffitas, areniscas tuffíticas e ignimbritas de la F. Sijes. La mineralización se concentra en la sección pelítica. El bórax se encuentra en capas con espesores de 1 a 3 metros. Recursos: 12,74 millones de toneladas.	Alonso, 1999 a Godeas <i>et al.</i> , 1999

## PROVINCIA DE JUJUY

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Boratayoc, Ludovica, Grupo Buenos Aires, Grupo Córdoba, Grupo Jujuy, Grupo Tucumán, Federico y otras</b>	Laguna Guayatayoc. Dep. Tumbaya y Cochinoca	23° 20' S 65° 53' O	Ulexita	El depósito de forma lenticular cubre unas 1.500 ha, el mineral se presenta en barras, con potencias de 2 a 23 cm y "papas" de tamaños menores a 10 cm, dispuestos entre material limoso y arcillas. En el sector suroriental de la laguna se presentan las mayores concentraciones de ulexita en "papas". Las reservas calculadas para este yacimiento alcanzan las 622.000 t de ulexita seca. (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 16,9-35,0 %).	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Salinas Grandes, Sahara, Bebe, Molina, Aguadita, Cerro Bayo, Cerro, Pululus, Delia, Esther, La Aveja</b>	Salinas Grandes. Dep. Tumbaya	s/d	Ulexita	En sus niveles más profundos presenta arcillas, limos y arenas finas, en donde se encuentra la ulexita en "papas". En la superficie presenta costras salinas que pasan a arena-limo-arcilla pardo rojizo, en partes con tono verdoso, con concentraciones yesíferas	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Tres Morros (Boratera de Tres Morros, Aguaditas y Pozo Clavado)</b>	Salinas Grandes. Dep. Tumbaya	23° 43' S 65° 57' O	Ulexita	La ulexita esta presente en varios puntos de la salina. El mineral se encuentra en superficie formando una parte superior en nódulos y una sección basal en barras. La capa tiene un espesor de hasta un metro. Debajo encontramos un manto de arcillas plásticas rojizas. Según Reichert (1907) la ulexita está libre de impurezas de ClNa con contenidos de 36,9 % B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999 Reichert, 1907 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Turi Lari</b>	Salar de Olaroz. Dep. Susques	23° 08' S 66° 31' O	Bórax, ulexita	Los evapocristales de bórax se encuentran en un manto de arcillas verdes de 90 cm de espesor con cristales de bórax de 1 a 3 cm, en una relación matriz: cristales 1:1. En las áreas donde el salar está seco hay transformación de bórax a ulexita (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 26,2-38,1 % en bórax; 19,3-22,6 % en ulexita). Reservas medidas e inferidas: bórax 11.089 t y ulexita 4.239 toneladas.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Lina Lari</b>	Salar de Olaroz. Dep. Susques	23° 08' S 66° 59' O	Ulexita, bórax	El bórax se presenta en pequeños cristales de 1 a 2 cm crecidos en arcilla tobácea.	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Celti</b>	Al sur de Turi Lari	s/d	Ulexita	Concentraciones de ulexita las cuales son explotadas esporádicamente	Alonso, 1999 b
<b>Lagunita</b>	Lagunita	s/d	Ulexita, inyoíta	El depósito mineral es reducido, no tiene interés económico. La superficie presenta eflorescencias salinas con arcillas, arenas y ulexita. La inyoíta se presenta en capas de 10 a 15 cm de espesor.	Alonso, 1999 b
<b>Santa Inés</b>	En la región sur del Salar de Olaroz. Dep. Susques	23° 31' S 66° 42' O	Ulexita	El yacimiento esta compuesto por 2 capas areno-limosas, de 30 cm de espesor, portadoras de "papas" de ulexita de 5 a 10 cm (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 9,04 %). El grupo de minas cubre 6 pertenencias en 600 hectareas.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983

## PROVINCIA DE JUJUY

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Jama, San Felipe, San Francisco</b>	Salar de Jama	24° 47' S 66° 42' O	Ulexita	Las evaporitas son esencialmente halita, yeso y en menor proporción ulexita. El espesor de la capa mineralizada oscila entre 15 - 8 cm, se estima una reserva del orden de las 150.000 toneladas.	Alonso, 1999 b Schalamuk <i>et al.</i> , 1983

## PROVINCIA DE SALTA

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Monte Gris, Playa 2,3 y Alejandro</b>	Flanco sudoriental de la serranía de Sijes	24° 45' S 66° 40' O	Ulexita, inyoíta	Pequeñas manifestaciones de escaso interés económico. Los afloramientos se encuentran muy cubiertos por materiales sueltos.	Alonso, 1999 a Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Anita, Perico, Maridel, Playa 1, Monte Marrón y Sorpresa 3</b>	Extremo austral de la serranía de Sijes	24° 47' S 66° 42' O	Ulexita, hidroboracita, inyoíta, colemanita	El cuerpo mineralizado es de 3 km de longitud, 300 – 500 m de ancho. La ganga esta constituida por bancos potentes de yeso / anhidrita y capas delgadas de travertinos y un nivel de areniscas cementadas por óxidos de manganeso.	Alonso, 1999 a
<b>Esperanza</b>	Flanco oriental de la serranía de Sijes	24° 40' S 66° 39' O	Colemanita, hidroboracita, inyoíta, ulexita	Las capas boratíferas yacen intercaladas en la parte media baja del miembro Esperanza de la formación. Sijes. La faja mineralizada tiene una longitud de 3 km y 37,15 de potencia. Están asociadas rocas evaporíticas, con-glomerados, tobas grises y blancas, y tufitas (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 33,59 %).	Alonso, 1999a Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>La Paz I, II, III y IV, Santa Elena y Santa Elvira</b>	En el norte de la serranía de Sijes	24° 34' S 66° 39' O	Ulexita, inyoíta, hidroboracita	La mineralización está alojada en una serie de islotes de rumbo NE-SO. Los islotes presentan una altura de 30-50 m, al pie de éstos existen acumulaciones de ulexita. Las pertenencias en esta región son húmedas al contar con un nivel freático alto.	Alonso, 1999 a
<b>Niño Muerto</b>	Salinas Grandes	23° 40' S 66° 10' O	Ulexita	La ulexita es masiva y "papa" en capas de hasta un metro de espesor, con fuerte contaminación de NaCl. El promedio de la capa mineralizada es de 30 cm, con predominio de "papas". Las reservas rondan las 500.000 t de borato crudo.	Alonso, 1999 b
<b>Grupo Minero Maggie</b>	Salar Centenario. Dep. Los Andes,	24° 55' S 66° 44' O	Ulexita	Depósito mantiforme de ulexita, con un encape salino de hasta 15 cm de potencia. La facies ulexítica es de naturaleza evaporítica, homogénea y monomineral en la que sobresale ulexita en barra dominante (85 % del total cubicado) al que se le asocia ulexita en "papa" subordinada (15%) en distintos porcentajes. Ley media entre 26 y 30 % de B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y humedad natural de 12 a 30 %.	SEGEMAR (Programa INDUSMIN 1996), Secretaría de Minería y Recursos Energéticos de la Provincia de Salta.

## PROVINCIA DE SALTA

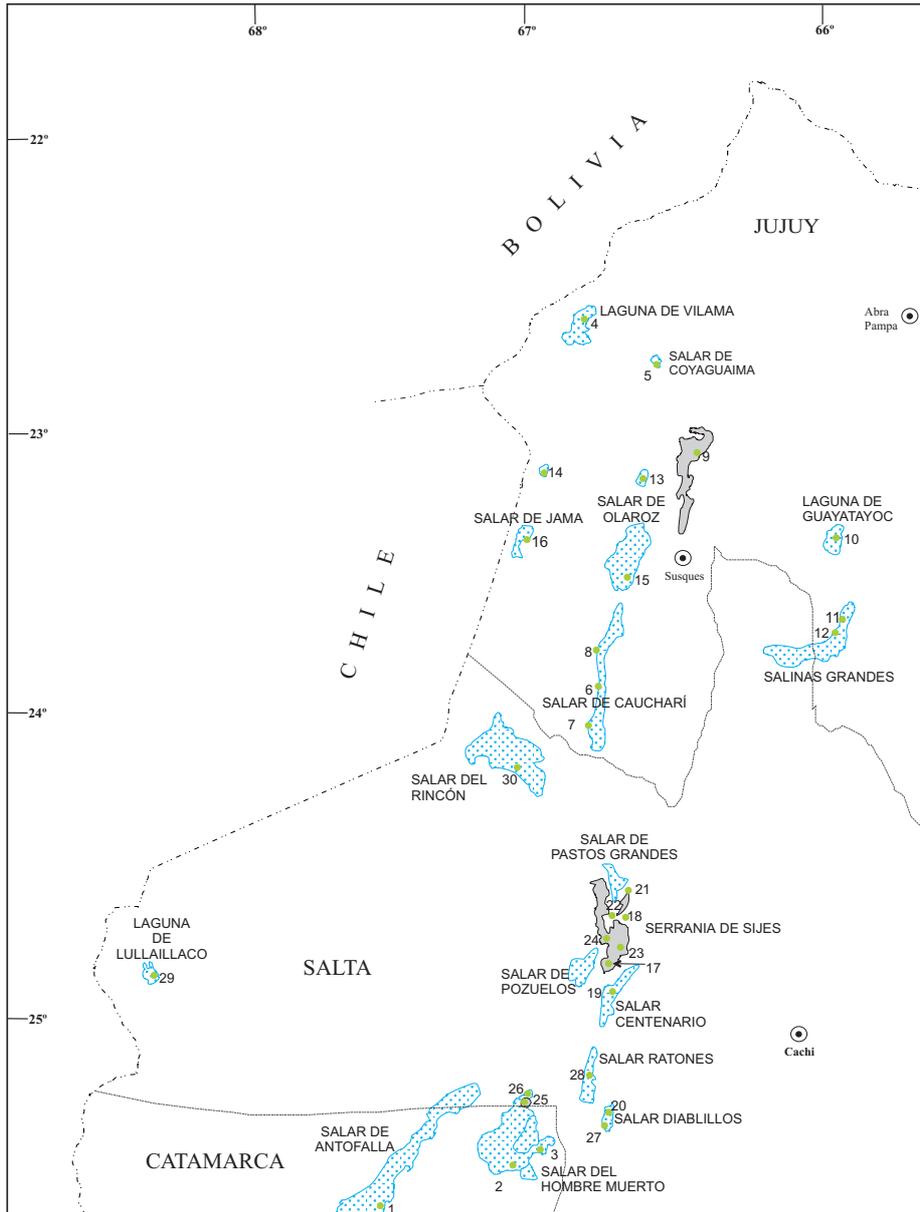
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Adela, Amalia, María Luisa</b>	Salar de Lullaillaco	24° 50' S 68° 17' O	B en salmuera	El porcentaje de boro en la salmuera del salar es del 0,30 %.	Alonso, 1999 b
<b>Grupo Minero Santo Domingo</b>	Salar Diablillos. Dep. Los Andes	25° 15' S 66° 44' O	Ulexita	Deposito mantiforme sedimentario singenético. ulexita en barras, que forman mantos con materiales clásticos limoarcillosos y arenosos, así como caliches de origen termal. Se trata de cuerpos homogéneos y macizos, monominerales, de distribución regular. El techo normalmente se encuentra soterrado bajo una delgada cubierta de eflorescencias salinas y materiales arcillosos que varían entre 2 a 15 cm de espesor, mientras que en el piso aparece una arenisca tobacea verde, caliches, arcillas negras fétidas, yeso u otros materiales clásticos. La clara diferencia cromática y textural entre los materiales hace que la ulexita sea perfectamente definible y distinguible con respecto a los materiales infra y suprayacentes.	SEGEMAR (Programa INDUSMIN 1996), Secretaría de Minería y Recursos Energéticos de la Provincia de Salta.
<b>Mina Apalacheana I,II,III</b>	Salar de Pastos Grandes. Dep. Los Andes	Sd	Hidroboraquita, inyoíta	Los bancos de hidroboraquita se encuentran plegados y fallados, intercalados con yeso, carbonatos e intervalos pelíticos finos. La relación hidroboraquita:inyoíta es del orden 85:15. El yacimiento tiene una gran abundancia de bancos yesíferos. Reservas Apalacheana I+II: 119.875 toneladas ( $B_2O_3$ : 9,4 – 43%).	Alonso, 1999 a
<b>Boralpa I a IV, Eduardo III, Maquiavelo, Sócrates, San Antonio</b>	Salar del Hombre Muerto	25° 15' S 66° 51' O	Ulexita y bórax.	La ulexita es el mineral predominante, existiendo manifestaciones de bórax en el extremo norte del salar. La ulexita se concentra en la mitad oriental, en capas de espesores variables, desde pocos centímetros hasta 1 metro, cubiertas por una delgada capa evaporítica. En general los niveles boratíferos presentan alternancias ulexita-clásticos (arena, limos, arcillas o gipsarenita) apoyado sobre arcillita roja o verde fétidas. La mineralización se presenta en "papas" o maciza.	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Monte Verde</b>	Se accede desde Monte Amarillo. Serranía de Sijes	24° 43' S 66° 40' O	Colemanita, inyoíta, hidroboraquita, ulexita.	Suprayace estratigráficamente a Monte Amarillo y está formada por colemanita e inyoíta. La ganga es arcillitas verdes, tufitas, tobas blancas y areniscas. La mineralización se concentra en unos 12 mantos principales con espesores entre 0,20 y 2,00 metros, en una corrida de 3 km de longitud.	Alonso, 1999 a Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Monte Blanco</b>	Serranía de Sijes, región sur	24° 40' S 66° 40' O	Inyoíta	Presenta escasas manifestaciones de inyoíta, intercaladas con limonitas, areniscas y conglomerados.	Alonso, 1999 a Godeas <i>et al.</i> , 1999

## PROVINCIA DE SALTA

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Monte Amarillo</b>	Serranía de Sijes, a 15 km al sur del campamento minero Sijes	sd	Hidroboracita, inyoíta, ulexita	Las capas de hidroboracita yacen intercaladas rítmicamente conformando la sección basal de la formación Sijes, miembro monte Amarillo, siendo su potencia de 137 m. Los bancos se caracterizan por un color blanco-amarillento. La ganga que acompaña al mineral son tufitas y también aparece junto a yeso, anhídrita y pelitas. Es el depósito boratífero más importante de la depresión Pastos Grandes y constituye la mayor reserva de hidroboracita del mundo.	Alonso, 1999a
<b>Monte Azul</b>	Serranía de Sijes, a 8 km al SO del campamento minero Sijes	24° 42' S 66° 40' O	Hidroboracita, inyoíta	El mineral se presenta en capas de 0,50 a 1m que por engrosamiento tectónico alcanzan 2 m de espesor. Son muy comunes las pátinas de arsénico. Constituye un apéndice de Monte Amarillo y muestra las facies típicas del miembro homónimo.	Alonso, 1999a Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Santa Rosa</b>	Serranía de Sijes, al NE del campamento minero Sijes	24° 39' S 66° 40' O	Hidroboracita, colemanita, inyoíta, ulexita.	Los boratos del depósito son colemanita e hidroboracita. La coloración dominante es amarilla (hidroboracita), verdosa (clastitas), grisácea (piroclastitas), el espesor del conjunto no supera los 300 metros. La colemanita constituye el principal mineral económico presente en las siguientes variedades: maciza, esferulítica, diseminada en geodas y drusas. La hidroboracita se presenta en estratos macizos con aspecto interior fibroso.	Alonso, 1999 a Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Julián, Marita, Ratones I y II, Jacinta, M. Luisa, Julio Cesár, Leonardo</b>	Salar Ratones, continuación austral del Salar Centenario	25° 09' S 66° 47' O	Ulexita	Los depósitos de ulexita se ubican en la zona centro-oriental del salar. La ulexita es tipo fibrosa y "papas" de 5 a 15 cm de diámetro. Las "papas" presentan mayor pureza. El mineral está asociado a limos, arcillas verdes y rojizos. Reservas: 805.500 t (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 24 %).	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Mina Ona</b>	Distrito Sijes. Dep. Los Andes	Sd	Colemanita, inyoíta	Los depósitos presentan una distribución irregular, cubiertos por material moderno. Los espesores son variables, desde centímetros hasta algunos metros. Rocas asociadas pelitas verdes, fangolitas verdes y marrones, arenas y yeso. La colemanita presenta anomalías de arsénico (450 – 372 ppm) Reservas 640.000 t (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 35%).	Alonso, 1999a
<b>Ducus IV, El Gallego, Futuro I, Pozuelo, San Mateo, San Marcos</b>	Salar Pozuelos, al oeste del salar Pastos Grandes	24° 41' S 66° 50' O	Ulexita	El yacimiento se encuentra en el sector noroccidental del salar. El encape está constituido por 60 cm de arena roja. La ulexita es maciza de 20 cm de espesor o diseminada. Si bien la ulexita es de buena calidad, el encape encarece los costos de explotación.	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983

## PROVINCIA DE SALTA

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Tincalayu</b>	Extremo noroccidental del Salar del Hombre Muerto, Península de Tincalayu,	25° 06' S 67° 03' O	Bórax, kernita, tincalconita, ulexita, probertita, inyoita, ezcurrita, rivadarita,	El yacimiento está constituido por un basamento de sal de roca, cubierto por limoarcilitas, areniscas, tobas y yeso. El cuerpo mineralizado conforma un lente deformado tectónicamente. Es un cuerpo prácticamente monomineral con algunas especies menores y raras (17 especies de boratos). Integra la formación Sijes. La ley de bórax promedio 18 %.	Alonso, 1999 a Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>La Despreciada, San Juan, San Pablo, San Pedro, Pascual, San Marcelo, Tosca</b>	Salar Diablillos, en el límite interprovincial Salta Catamarca	25° 14' S 66° 44' O	Ulexita	El salar presenta sedimentos arenosos, arcillosos y cenizas volcánicas. La mineralización se concentra en una capa de 0,5 m de espesor y cubre una superficie de 15 km <sup>2</sup> dispuesta sobre arcillas plásticas verdes e infrayaciendo a una delgada eflorescencia salina. La ulexita esta en "papas" y barra, teniendo la segunda variedad un mayor grado de pureza (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 35 %).	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>El Hornero, Toro Muerto, El Surí, Arunco, La Cobriza, La Nuestra, Carolina, Tincal, Viamonte, Izmir y otras</b>	Salar de Rincón	24° 08' S 67° 07' O	Ulexita, bórax	El salar tiene una capa continua de sal en superficie de espesores variables. El borato se encuentra a 20 o 30 cm por debajo del encape. La ulexita se presenta tanto maciza como en "papas" y un espesor de 50 cm. El bórax yace en el borde nororiental del salar, dentro de una ganga limo-arcilloza rojiza.	Alonso, 1999 b Godeas <i>et al.</i> , 1999



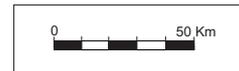
PRINCIPALES DEPÓSITOS DE BORATOS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA



SITUACIÓN RELATIVA

REFERENCIAS

- Boratos en salares cuaternarios
- Boratos en rocas terciarias
- Principales yacimientos de boratos
- Límite internacional
- Límite interprovincial
- Cabecera de departamento



Provincia	N°	Depósito	Distrito	Mineralogía	Leyes B2O3 (%)	Edad
Catamarca	1	Salar de Antofalla	Salar de Antofalla	Ulx		TN
	2	Alberto, Centenario y Flavio	Salar del Hombre Muerto	Ulx		Q
Jujuy	3	Ricardo, Horacio y Eduardo	Salar del Hombre Muerto	Ulx		Q
	4	Boratera Vilama, Cerro Tinte	Laguna Vilama	Ulx		Q
	5	Edith (Boratera Coyaguaima)	Salar de Coyaguaima	Ulx, Bx	Ulx: 30,7 - 41,3	Q
	6	Grupo Minero La Inundada	Salar de Cauchari	Ulx, Bx	Bx: 11,1	Q
	7	Campamento 1° de Mayo	Salar de Cauchari	Ulx	Ulx: 32,5	Q
	8	El Porvenir	Salar de Cauchari	Ulx, Bx, Bc, Hbc, Cle	Ulx: 16,0 - 32,7	Q
	9	Loma Blanca	Salar de Coranzulí	Iny, Bx, Ulx, Cle		TN
	10	Grupo Buenos Aires,	Laguna Guayatayoc	Ulx	Ulx: 16,9 - 35,0	Q
	11	Salinas Grandes; Aguadita	Salinas Grandes	Ulx		Q
	12	Tres Morros	Salinas Grandes	Ulx	Ulx: 36,9	Q
Salta	13	Turi Lari	Salar de Olaroz	Bx, Ulx	Bx: 26,2 - 38,0	Q
	14	Lina Lari	Salar de Olaroz	Ulx, Bx		Q
	15	Santa Inés	Salar de Olaroz	Ulx	Ulx: 9,04	Q
	16	Jama	Salar de Jama	Ulx		Q
	17	Anita, Perico, Monte Marrón	Serranía de Sijes	Ulx, Hbc, Cle, Iny		TN
	18	Esperanza	Serranía de Sijes	Cle, Hbc, Iny, Ulx	Cle: 33,6	TN
	19	Grupo Minero Maggie	Salar Centenario	Ulx	Ulx: 26,0 - 30,0	Q
	20	Grupo Minero Santo Domingo	Salar Diablillos	Ulx		Q
	21	La Paz I a IV y Santa Elena	Serranía de Sijes	Ulx, Iny, Hbc		TN
	22	Mina Apalacheana I a III	Salar de Pastos Grandes	Hbc, Iny	Hbc: 9,4 - 43,0	TN
	23	Monte Amarillo	Serranía de Sijes	Hbc, Iny, Ulx		TN
	24	Monte Azul	Serranía de Sijes	Hbc, Iny		TN
	25	Tincalayu	Salar del Hombre Muerto	Bx, Ker, Iny, Ulx	Bx: 18,0	TN
	26	Boralpa I a IV y Eduardo III	Salar del Hombre Muerto	Ulx, Bx		Q
	27	La Despreciada y San Juan	Salar Diablillos	Ulx	Ulx: 35,0	Q
	28	Julián, Ratones I y II, Jacinta	Salar Ratones	Ulx	Ulx: 24,0	Q
	29	Adela, Amalia y María Luisa	Salar Llullaillaco	Salmuera	(Boro: 0,3)	Q
	30	El Hornero, Toro Muerto y Surí	Salar de Rincón	Ulx, Bx		Q

Abreviaturas: Ulx: ulexita; Bx: boráx; Bc: boracita; Hbc: hidroboracita; Cle: colemanita; Iny: inyoita; Ker: kernita; TN: terciario-neógeno; Q: cuaternario.

## 1.7. BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, R. N. 1999 a. “*Boratos terciarios de la Puna, Jujuy, Salta y Catamarca*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1779-1826, Buenos Aires.
- ALONSO, R. N. 1999 b. “*Los salares de la Puna y sus recursos evaporíticos, Jujuy, Salta y Catamarca*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1907-1921, Buenos Aires.
- ALONSO, R. N., 1996. “*El yacimiento boratífero de Laguna Salinas, Perú*”. XIII Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 297-308. Buenos Aires.
- ALONSO, R. N., GUTIÉRREZ, R., 1984. “*Zonación de ulexita en los salares de la Puna Argentina*”. Asoc. Geol. Argentina, Revista, 39(1-2), 52-57, Buenos Aires.
- ALONSO, R. N., VIRAMONTE, J. G., 1993. “*La cuestión genética de los boratos de la Puna*”. 12° Congreso Geológico Argentino. Actas, 5: 187-194, Mendoza.
- ALONSO, R. N., VIRAMONTE, J. G., 1985. “*Provincia Boratífera Centroandina*”. 4° Congreso Geológico Chileno, Actas, 2: 45-63, Antofagasta, Chile.
- ANGELELLI, V., BRODTKORB, M. K., GORDILLO, C. E., GAY, H.D., 1983. “*Las Especies Minerales de la República Argentina*”. Publicación Especial. Servicio Minero Argentino.
- ARGAÑARAZ, R., NADIR, A., 1979. “*Contribución al conocimiento de la mineralogía y génesis de la boratera de Antuco, Salta*”. VI Congreso Geológico Argentino, Actas 3 : 9-11, Bahía Blanca.
- BATTAGLIA, R. R., ALONSO, R. N.: 1992. “*Geología y Minería de Ulexita en el Grupo Minero Maggie, Salar Centenario, Salta*”. IV Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 241-252, Buenos Aires.
- CASTILLO, A. L., BATTAGLIA, R. R., DAROCA, R.J., MORELLO, C., 1992. “*Yacimientos de ulexita en el salar de Hombre Muerto, Salta, Catamarca, R. Argentina*”. IV Congreso Nacional de Geología Económica, Actas, 272-279.
- CATALANO, L., 1964. “*Estudio geológico-económico del salar del Hombre Muerto*”. Secretaría de Minería. Serie Argentina, 4: 1-133, Buenos Aires.
- CATALANO, L., 1927. “*Geología química de los boratos*”. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Publicación, 28: 1-101, Buenos Aires.
- CATALANO, L., 1926. “*Geología de los yacimientos de boratos y materiales de las cuencas. Salar de Cauchari. Puna de Atacama*”. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Publicación, 23: 1-110, Buenos Aires.
- CHONG, G.; PUEYO, J. J.; DEMERGASSO, C., 2000. “*Los Yacimientos de Boratos en Chile*”. Revista Geológica de Chile, Vol. 27, N°2: 99-119.
- GODEAS, M., CARRIZO, R., CRUZ ZULOETA, G., GONZÁLES (H), R., KORZENIEWSKI, L., LÓPEZ, H., MALLIMACCI, H., MARTÍNEZ, L., RAMALLO, E., VALLADARES, H., ZUBIA, M., 1999. “*Inventario de yacimientos y manifestaciones de minerales metalíferos e industriales de la República Argentina*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1907-1921, Buenos Aires.
- HURLBUT, C. JR., 1980. “*Manual de mineralogía de Dana*”. 2<sup>da</sup> edición. Editorial Reverté, pag: 653.
- KISTLER R. B. AND HELVACI C., 1994. “*Boron and Borates*”. En: Industrial Minerals and Rocks .6<sup>th</sup> Edition Donald D. Carr Senior Editor. AIME, 171-186.
- MARCUZZI, J., BATTAGLIA, R. R.: ARGARAÑAZ, R. A., 1992. “*Estudio geológico económico de las minas de borato Walterio, San Francisco y San Esteban, Salinas Grandes, La Poma; Salta*”. VI Congreso Geológico Argentino,

Actas 3: 544-545, Bahía Blanca.

SCHALAMUK, I.; FERNANDEZ, R.;  
ETCHEVERRY, R., 1983. “*Los  
Yacimientos de Minerales No  
Metalíferos y Rocas de Aplicación de  
la Región NOA*”. Subsecretaría de  
Minería. Ministerio de Economía.

Anales, 20, Buenos Aires.

SUIM, 2001/2002. Sistema Unificado de  
Información Minera. [www://  
suim.gov.ar](http://www://suim.gov.ar)

WEDEPOHL, K. H., 1978. “Handbook of  
Geochemistry”. Vol. II/1 Elements H(1)  
to Al (13). Executive Springer Verlag.

## Capítulo 2

### PROCESAMIENTO DE MINERALES PORTADORES DE BORO

#### 2.1. GENERALIDADES

El boro no se encuentra en la naturaleza como un elemento en estado libre, sino combinado siempre con el oxígeno, en forma de óxido de boro y boratos. Existen sólo diez boratos que son utilizados comercialmente y que se encuentran en depósitos sedimentarios. De ellos los de mayor importancia económica son la ulexita, la colemanita, la hidroboraquita y el bórax. Posiblemente, el más conocido de ellos es el bórax

(tincal), un compuesto blanco cristalino, que corresponde a tetraborato de sodio decahidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

Las impurezas que acompañan al boro son As, Fe, y microimpurezas de alcalinos como Li y S. Los minerales que conforman la ganga en una mena de boratos son carbonatos, sulfatos, arcillas y sales solubles (cloruros y sulfatos solubles).

La industria del procesamiento de los minerales de boratos cubre los siguientes aspectos:

OBTENCIÓN DE	METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN	MATERIAS PRIMAS
Concentrados	Por vía seca: -trituración y clasificación -concentración por separación magnética y electrostática -concentración por calcinación Por vía húmeda: -concentración gravitacional -concentración por flotación	A partir de minerales portadores de boratos
Óxido de boro	-Acidificación y fusión de bórax -Deshidratación del ácido bórico	A partir de concentrados de tincal, bórax y colemanita; ácido bórico, salmuera de lagos
Bórax anhidro	-Deshidratación de bórax	A partir de concentrados de tincal, bórax y colemanita; salmuera de lagos
Ácido bórico	-Extracción por solventes y acidificación de salmuera -Reacción del bórax con ácido sulfúrico -Reacción de concentrados de colemanita / ulexita con ácido sulfúrico	A partir de concentrados de colemanita, bórax y tincal; salmuera de lagos

#### 2.2. PROCESOS DE PURIFICACIÓN

Para describir los métodos de procesamiento de boratos, conviene subdividirlos en dos categorías:

a) Boratos solubles en agua: entre los mismos, los más importantes son los boratos de sodio, particularmente las distintas formas en que se presenta el bórax, tincal y kernita.

b) Boratos insolubles en agua: los más importantes son colemanita, hidroboraquita, ulexita y probertita.

De acuerdo a la categoría a la que pertenezcan,

el procesamiento de boratos sigue distintos procedimientos, esto es, procesos por vía seca y procesos por vía húmeda. Generalmente una etapa previa común a cualquiera de estos procesos es una disminución de tamaño por medio de una trituration.

#### 2.3. OBTENCIÓN DE CONCENTRADOS DE BORATOS POR VIA SECA

Las restricciones ambientales relacionadas con la generación de residuos con alto contenido de boro

de difícil manejo en los procesos en húmedo, favorecen el desarrollo de las técnicas en seco. Los métodos que se describen a continuación se utilizan como pre-concentración tanto para boratos solubles como para insolubles.

### 2.3.1 ELIMINACIÓN DE IMPUREZAS

#### Por clasificación

Se utiliza generalmente trituración y posterior clasificación en tamaños, lográndose una acumulación selectiva de boratos en alguna de las fracciones granulométricas obtenidas. La fracción granulométrica que resulta enriquecida en borato depende de cómo se presente el mineral y la ganga asociada. Es común en algunos depósitos que el borato, en particular la ulexita, se presente como “barras” o “papas” rodeadas de impurezas, que generan distinto tipo de partículas durante el proceso de disminución de tamaño. En general, debido a la geometría, el mineral que se presenta en forma de papas, logra un enriquecimiento adicional cuando el proceso de clasificación se realiza en zarandas tipo trommel, donde por rozamiento y “atrición” entre los trozos redondeados, se eliminan las impurezas superficiales que se concentran en los finos que se separan en el trommel. Este proceso de “limpieza” de la superficie tiene su límite al momento que, además de impurezas se empieza a perder borato en cantidades tales que van en desmedro de la recuperación en esta operación. En ese momento se procede a una nueva etapa de trituración para exponer nuevas superficies recubiertas de impurezas que serán susceptibles de ser limpiadas por atrición y rozamiento en otro trommel. Cuando el mineral se presenta como barras o en capas alternadas con impurezas, compuestas generalmente por arcillas portadoras de hierro, cuarzo y sales solubles, el material se tritura y clasifica. El procesamiento por clasificación se realiza a través de una serie de zarandas para permitir la separación de los distintos tamaños, obteniéndose productos con distinta calidad pero, en general, las fracciones finas concentran las impurezas y las intermedias y gruesas el borato. El logro de una fracción granulométrica con alta ley de borato condiciona la estrategia de planta, generando distintos circuitos de reprocesamiento de las fracciones granulométricas que se separan en la zaranda. El reprocesamiento puede in-

cluir una nueva trituración y clasificación, separación magnética y electrostática o técnicas en húmedo para eliminar sales solubles que no se separan por los métodos anteriores. Las fracciones que no llegan a través de este mecanismo a una ley comercialmente aceptable, se someten a un proceso adicional de clasificación en corriente de aire o en mesas neumáticas.

#### Por calcinación

Una característica importante de los boratos es que poseen agua de cristalización en su estructura, y que la misma se pierde por calentamiento a temperaturas de hasta 500°C. Esta pérdida de agua genera un aumento en la concentración de  $B_2O_3$ . El producto calcinado se vuelve químicamente más activo. En este sentido, la calcinación permite el aumento del tenor de  $B_2O_3$ , pero también aumenta el contenido de impurezas de manera proporcional. Por lo tanto, la calcinación de un borato como proceso de concentración o aumento del contenido de boro, debe ser aplicada sobre materiales con cierto grado de purificación y eliminación previa de las impurezas. Dublanc (1991) indica los valores de  $B_2O_3$  que son posibles alcanzar teóricamente por calcinación de ulexita en función de la ley de cabeza del mineral antes de la calcinación.

El fenómeno de decrepitación que ocurre por efecto del calentamiento de colemanita puede ser aprovechado para lograr la concentración selectiva del borato, respecto de las impurezas, por clasificación *a posteriori* de la calcinación (Aytekin y Badruk, 1992). Por ejemplo, cuando la colemanita se calienta a la temperatura de descomposición, decrepita. La decrepitación es característica únicamente de este mineral de boro, ya que la ulexita tan solo pierde su agua de cristalización pero con una contracción de la estructura. Por efecto de la decrepitación, se obtiene un producto rico en colemanita con menor tamaño de partícula, 80% por debajo de 0,2 milímetros.

A diferencia de estos dos minerales, el bórax exhibe un comportamiento interesante frente al calor. Por calentamiento, su volumen aumenta gradualmente produciendo un sonido característico. Este comportamiento permite la separación de gangas minerales, principalmente arcillas tipo montmorillonita.

Celik *et al.* (1998) estudiaron los efectos de la calcinación en los tres minerales mencionados

y observaron que:

a) Las condiciones óptimas para la decrepitación de la colemanita pura son 500°C y un tiempo de reacción de 15 minutos.

b) El contenido de  $B_2O_3$  en un concentrado de colemanita pasó de 42,97% a un 57,14%, posterior al tratamiento térmico.

c) La ulexita no sufre decrepitación, sino contracción con el aumento de la temperatura.

d) El bórax presenta dilatación bajo condiciones de calentamiento moderadas. Puede ser purificado por calcinación seguido de fragmentación y clasificación aérea, lo cual permite la separación de las gangas minerales. Mediante este ensayo, se pudo obtener un producto que contiene un 51,05% de  $B_2O_3$ . Los autores afirman que, en general, la mayor dilatación coincide con las mejores condiciones de separación de las gangas, mencionando que la dilatación se inicia por encima de los 100°C. A 217°C, el volumen es 2,4 veces el original, llegando a 3,0 veces a 450°C, temperatura por encima de la cual se observa una disminución en la dilatación.

e) Comparando métodos para la purificación de bórax en escala piloto, aquellos que involucran la calcinación son comparativamente mejores que los métodos en húmedo usados actualmente en algunos procesos industriales. La mayor ventaja del esquema en seco es que genera un producto que puede ser peletizado o briquetado de acuerdo a las necesidades. Más importante aún, se minimizan los problemas ambientales que produce el tratamiento en húmedo, como fue mencionado anteriormente.

Eric (1987) evaluó comparativamente la calcinación de colemanita realizada en lecho fijo, horno rotativo y lecho fluidizado, y encontró que el tiempo de calcinación cambia de 2,5 horas en el lecho fijo a 1,5 horas en el rotativo, necesitando tan solo 20-30 minutos en el lecho fluidizado. El trabajo concluye además sobre los tamaños de partícula en la alimentación más adecuados para el horno rotativo y el lecho fluidizado.

Smith y Walters (1980) proponen un esquema que incluye la calcinación, clasificación granulométrica y separación de impurezas por tablas de aire en cada una de las fracciones. Las variables experimentales que influyen sobre la concentración en las tablas de aire son la velocidad de la vibración, la inclinación de la superficie, la cantidad de aire y la velocidad de alimentación. Los ensayos realizados concluyen en que

todas las fracciones granulométricas pueden ser concentradas por este método.

### Por separación magnética y electrostática

Los procesos de separación magnética convencionales utilizados en la industria de los minerales, comprenden circuitos electromagnéticos o con imanes permanentes de baja intensidad. Sin embargo, al procesar minerales con una baja susceptibilidad magnética o un tamaño muy pequeño de partículas, los mismos son ineficientes. Un circuito magnético convencional posee, además del inconveniente mencionado, las desventajas que representan tanto el consumo de electricidad (para generar un campo magnético de baja intensidad, aproximadamente 2T), como el tamaño que presentan los circuitos magnéticos.

Un gran avance tecnológico significó la introducción de los imanes permanentes de alta intensidad y gradiente de campo magnético a base de imanes de tierras raras. En Argentina, la empresa Bórax Argentina implementó en 1997 un circuito de este tipo para la concentración de hidroboracita, que llega a la planta de beneficio con 34% de  $B_2O_3$ . Mediante sucesivas etapas de trituración, clasificación y separación magnética con rodillos con imanes permanentes de tierras raras sobre fracciones con granulometrías entre 10 y 70 mallas, se obtiene un producto con una ley de 42% de  $B_2O_3$  que se destina a la producción de cerámicas de cocción rápida. En este caso, como en muchos otros, las impurezas magnéticas, que en general son arcillas con altos contenidos de hierro, son además portadoras de arsénico (Industrial Minerals, 1999).

Erkal y Girgin (1992) estudiaron las posibilidades de beneficiar las colas de la planta de concentración de colemanita en Etibank (Turquía), mediante el uso de separadores magnéticos de alta intensidad en seco, con rodillos de tierras raras combinado con calcinación-decrepitación, partiendo de un residuo con un contenido de  $B_2O_3$  de 15%, Fe de 1,61% , As de 1,59% y granulometría inferior a 25mm. Los autores obtuvieron un producto conteniendo  $B_2O_3$  (42%), Fe (0,19%), As (1,04%), y otro conteniendo  $B_2O_3$  (58%), Fe (0,11%) y As (0,38%), ambos con distinta granulometría.

Por otra parte, Celik y Yasar (1995) señalan lo escaso de los antecedentes bibliográficos sobre la aplicación de la separación electrostática

a la purificación de boratos, mencionando la existencia de un trabajo de Kaytaz, donde se indica que la separación electrostática puede concentrar colemanita de su ganga mineral con relativo éxito. En particular, el aumento de la temperatura mejora dicha separación (Kaytaz *et al.*, 1986).

El objetivo del trabajo de Celik y Yasar fue el de estudiar si los minerales de boro puros son conductores, o si la conductividad observada es impartida por las impurezas en la mena. Para ello, con muestras de los minerales de boro más importantes -colemanita, ulexita, bórax y sus gangas arcillosas (montmorillonita, principalmente), se realizaron un conjunto de pruebas sistemáticas de separación electrostática variando la temperatura y se observó que:

a) La colemanita se comporta como un material aislante, tanto con electrodos tipo estáticos, de carga inducida, o de rayo o corona de bombardeo iónico, mientras que la ulexita, el bórax y las arcillas minerales asociadas exhiben características comunes a los minerales conductores.

b) La temperatura tiene una influencia pronunciada sobre la conductividad de la ulexita y el bórax (debido a los cambios en su estado de hidratación con la temperatura), con una menor influencia sobre la colemanita cuya deshidratación se produce a los 262°C. Mientras que la ulexita y el bórax son conductores a temperatura ambiente, alcanzan un mínimo, a medida que la temperatura aumenta, volviendo a ser conductores a partir de los 80°C. La pérdida de conductividad ocurre a temperaturas donde comienza la deshidratación de estos minerales.

c) Aunque algunos minerales de boro puros se consideran materiales aislantes, sin embargo, es conocida y esperada la presencia de elementos alcalinos y alcalinotérreos como litio y estroncio que deben ser tenidos en cuenta durante el diseño de estrategias de separación electrostática, ya que son los responsables de cambios en la conductividad de los minerales.

### 2.3.2. SEPARACIÓN DE BORATOS ENTRE SÍ

#### Colemanita - ulexita

Sener y Özbayoglu (1992, 1995 y 1998) investigaron la separación de colemanita de la ulexita aprovechando los diferentes cambios es-

tructurales que se producen en estos minerales durante un proceso de calcinación. Como todos los boratos hidratados, éstos también pierden su agua de cristalización a determinadas temperaturas, las cuales están relacionadas con la variación de la presión de vapor y la temperatura de descomposición. Debido al calentamiento y a esta pérdida, las estructuras cristalinas de algunos de estos minerales se expanden, se tensionan y se generan microfisuras que se desarrollan a través de todo el cristal, volviéndose más porosos y, por lo tanto, más fáciles de fragmentar. La colemanita es uno de los boratos que presenta este fenómeno, pero como la pérdida de agua se realiza súbitamente, la misma decrepita. A diferencia de ésta, la ulexita exfolia mientras se produce la pérdida gradual del agua de cristalización, lo que produce una estructura de tipo amorfo que tiene muchas fisuras e intersticios. Los autores estudiaron los parámetros de calcinación de una ulexita de Bigadic (Turquía), tales como la temperatura, el tiempo y el tamaño de partículas, concluyendo que:

a) el tiempo de calcinación y la temperatura tienen un marcado efecto sobre el grado del producto. Calcinaciones más extensas a temperaturas más bajas, o viceversa, brindan similares resultados.

b) La velocidad de calcinación es influenciada por el tamaño de partículas. El tamaño óptimo se encuentra en  $-1,65+0,42$  mm.

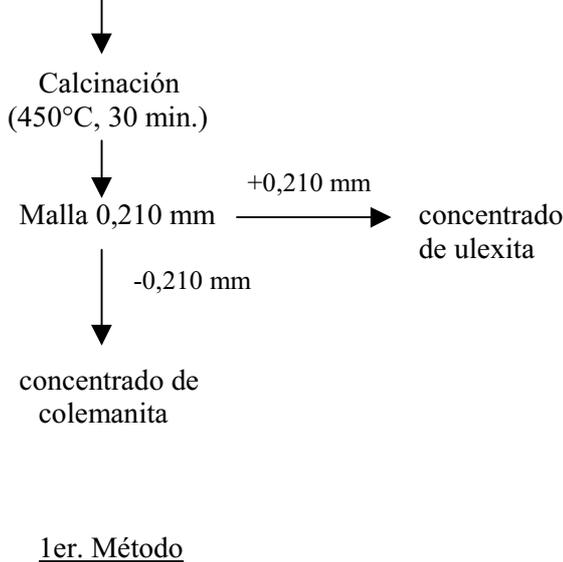
Sobre las muestras de ulexita y colemanita se llevó a cabo un análisis térmico gravimétrico (ATG). Se empleó un analizador térmico gravimétrico Dupont 9900. La velocidad de calentamiento fue de 10°C/minuto. Los resultados fueron evaluados midiendo las pérdidas de peso de las muestras y mediante el análisis químico del  $B_2O_3$  y del  $Na_2O$ . Los cambios estructurales producidos en los minerales calcinados, se evaluaron mediante difracción de rayos (XRD) y microscopía óptica.

Mediante el ATG se determinó que el pico máximo de deshidratación de la ulexita está alrededor de los 190°C. Asimismo, los estudios mineralógicos mostraron que dicho mineral pierde el agua de cristalización gradualmente, formando una estructura más porosa y friable cerca de los 300°C. Por sobre esta temperatura, adquiere dureza y una estructura compacta durante el proceso de calcinación. A temperaturas aún más elevadas, adquiere una estructura

amorfa. Con relación a la colemanita, pierde el agua de cristalización rápidamente y decrepita a 390°C.

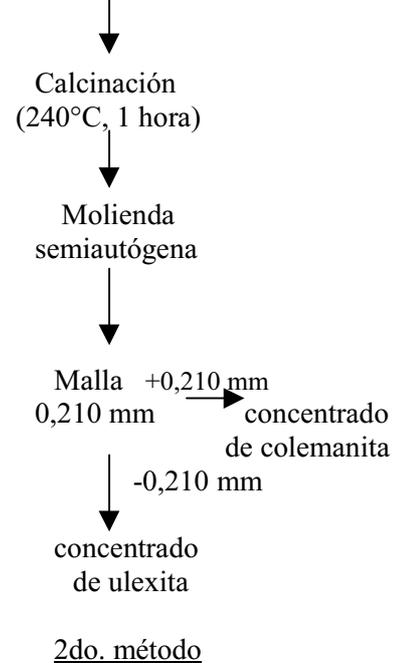
A fines de lograr la separación entre ambos minerales, Sener y Özbayoglu evaluaron dos métodos:

#### Mezcla ulexita-colemanita



todos alternativos que incluyen: 1) calcinación de ulexita y 2) separación de ulexita-colemanita mediante la utilización de cambios estructurales formados después de la calcinación, según los siguientes esquemas:

#### Mezcla ulexita-colemanita



En el primer método, una mezcla de ulexita y colemanita se calcinó a 450°C durante 30 minutos, durante el cual la ulexita adquirió dureza, mientras que la colemanita decrepita. La mezcla calcinada fue tamizada con malla con abertura de 0,210 mm, produciendo un concentrado de ulexita retenido, cuyo grado obtenido fue de 62,86%. El grado original de la ulexita empleada fue de 40,87%. Los autores calcularon la recuperación del mineral en un 96,63% en B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Con relación a la colemanita obtenida en la fracción de menor granulometría, el grado obtenido fue de 59,67% y el original era de 49,32%.

En el segundo método, la mezcla de ulexita y colemanita se calcinó a 240°C durante 60 minutos. Durante la calcinación, la ulexita se volvió friable, mientras que la colemanita mantuvo su estructura cristalina. Luego, durante una etapa de molienda semiautógena, la ulexita más friable disminuye su tamaño con mayor facilidad, concentrándose en las fracciones de menor granulometría y pudiendo ser separada por tamizado. El grado del concentrado de ulexita obtenido fue de 54,20%, y la recuperación del mineral alcanzó un 98,43% en B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### **Colemanita–hidroboracita**

La aplicación posterior tanto de concentrados de colemanita o de hidroboracita requiere el cumplimiento de un contenido dado de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> más que la pureza de la especie mineral considerada (colemanita o hidroboracita). No obstante, la posibilidad de separación de estas especies a partir de una muestra portadora de partículas, en tamaño de granos perfectamente liberados, fue estudiada a los fines de la caracterización, y se realizó utilizando un equipo de separación electrostática, lográndose separar experimentalmente estas especies (Celeda y Mattenella, 2001). De los ensayos preliminares realizados se concluye que la diferencia en la composición química y la distinta estructura cristalina, le imprime a uno de ellos un comportamiento distinto frente a la generación de un dipolo eléctrico por bombardeo de cargas desde la corona y posterior descarga al contacto con el tambor que gira, generándose una diferencia entre las trayectorias de las partículas de colemanita y las de hidroboracita.

## 2.4. OBTENCIÓN DE CONCENTRADOS DE BORATOS POR VÍA HÚMEDA

### 2.4.1. BORATOS SOLUBLES

Al ser puestos en contacto con agua solubilizan, separándose de las especies insolubles (impurezas que pueden acompañarlos como arcillas u otras especies minerales indeseables), mediante procesos de separación sólido-líquido (por ej. floculación y sedimentación, centrifugación), que permitan una separación eficiente entre la solución acuosa y el material insoluble en suspensión.

En general, las especies químicas que pasan a solución no serán solo boratos solubles, ya que también lo harán los cloruros o sulfatos solubles. Posteriormente, el bórax decahidratado se obtiene por cristalización fraccionada, en condiciones de operación que promuevan selectividad en la recuperación de los cristales (Dublanc, 1991). Teniendo en cuenta las concentraciones de los iones cloruros y sulfatos, se trabaja con diagramas de solubilidad-temperatura, para encontrar las condiciones en las cuales cristalice preferentemente el bórax, separándose una solución enriquecida en las impurezas solubles.

En la provincia de Salta, la empresa Bórax Argentina extrae el tincal de la mina Tincalayu, realizando una trituración primaria y homogeneización en pilas de acopio para asegurar una ley constante de 18% de  $B_2O_3$  a la planta de beneficio, donde el material es triturado y clasificado con una zaranda. El sobretamaño (>6mm) se reduce en un molino a martillos. El mineral es lavado con solución saturada para remover las arcillas realizándose el deslamado de los finos en hidroclasificadores. Las arcillas son floculadas y decantadas para ser devueltas al salar, mientras que el licor clarificado es retornado a la planta de lavado. Según su granulometría el tincal lavado pasa a distintas zarandas y mesas vibratorias para producir un concentrado con un 28% de  $B_2O_3$  (Industrial Minerals, 1999).

### 2.4.2. BORATOS INSOLUBLES

El proceso de flotación puede constituir una alternativa frente a la calcinación para el caso de colemanita, aunque logrando leyes menores que las del borato calcinado (Dublanc, 1991). Los

procesos en húmedo más comunes son:

a) Clasificación en húmedo: se realiza clasificación por tamaños utilizando equipos como mesas vibratorias, hidrociclones o espirales tipo Akins. En algunos casos, como por ejemplo para la ulexita, la baja densidad del borato puede ser un factor importante para favorecer la clasificación selectiva. Delice *et al.* (1998) evaluaron la posibilidad de mejorar la calidad de un concentrado de ulexita obtenido por tratamiento en vía seca mediante lavado y clasificación en húmedo, logrando así aumentar el contenido de  $B_2O_3$  del concentrado de 30 a 38%.

b) Flotación por espuma: el proceso de flotación mediante espumas es uno de los más utilizados en concentración de minerales. Se basa en el hecho de que las partículas hidrofílicas se mojan por el agua, y las hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire. Por lo tanto, en una suspensión de partículas de mineral molido en agua, las burbujas se adhieren a las partículas sólidas hidrofóbicas y se mueven hacia la superficie. Como resultado, los agregados aire-sólido quedan en la superficie formando una capa de espuma mineralizada. La capa de espuma se remueve manual o mecánicamente, dando como resultado la separación de las partículas hidrofóbicas de las hidrofílicas.

En general, puede decirse que la concentración de boratos por medio de la flotación, es la última alternativa a utilizar si mediante las anteriormente descritas no se puede lograr la recuperación económica, en especial del borato que se pierde con las granulometrías finas (por debajo de 0,2 mm). Si bien la flotación es aplicada en los EE.UU, existe poca información sobre la tecnología y el "know how", como también se encuentran pocos trabajos a nivel laboratorio o planta piloto sobre minerales "reales". Tan sólo existen trabajos sobre especies puras y en forma separada (Celik *et al.*, 1992).

Pocovi *et al.* (1994) informaron los resultados del estudio de concentración de colemanita e hidroboracita mediante el proceso de flotación por espumas. Los autores estudiaron el efecto de una serie de variables sobre el contenido y la recuperación de  $B_2O_3$  en los productos flotados, arribando a los siguientes resultados:

a) la variable que provoca el efecto más significativo sobre la recuperación del óxido es la concentración de reactivo promotor (alquil sulfonato).

b) en minerales de ley media y baja conviene trabajar con los niveles más altos de concentración de reactivo promotor, mientras que para alta ley convienen las concentraciones menores.

c) en todos los casos se notan mejores resultados trabajando en los niveles inferiores de concentración de sólidos y tiempo de acondicionamiento.

Acerca de las condiciones de trabajo que permiten considerar el proceso de flotación por espuma como una importante alternativa para concentrar colemanita e hidroboraquita, los autores concluyen:

a) Colemanita: con una ley de cabeza entre 14% y 35% de  $B_2O_3$  es posible recuperar entre el 80% y 90% del borato con una ley del producto concentrado de 41%  $B_2O_3$  y una ley de colas de 5%  $B_2O_3$ .

b) Hidroboraquita: con una ley de cabeza entre 15% y 30% de  $B_2O_3$  es posible recuperar entre el 70% y 80% del borato con una ley del producto concentrado de 42%  $B_2O_3$  y una ley de colas de 15%  $B_2O_3$ .

Por otra parte, existen dos vías para la flotación de los minerales de boro. Una es la llamada flotación directa del borato y la otra es la flotación inversa, donde se flotan las gangas minerales o las impurezas del mineral considerado.

En la flotación directa, la solubilidad de algunos de los boratos (ej. tincal) puede afectar el proceso en su conjunto. Cada mineral de boro tiene sus propias características que deben ser evaluadas previamente, pero se asume que el porcentaje de sólidos en la flotación debe ser 20-40% p/p. La flotación directa de boratos se lleva a cabo al valor natural de pH en la suspensión acuosa de partículas del mineral, y utilizando colectores y espumantes.

Para la colemanita, se conocía que los iones  $Ba^{2+}$  (como  $BaCl_2$ ) activan la flotación del mineral en presencia de un anión surfactante, dodecilsulfato de sodio (SDS), aunque los mecanismos de interacción no eran conocidos. Celik *et al.* (1992) elucidaron los mismos mediante ensayos de microflotación, medición del potencial Z y medidas de absorción sobre la colemanita pura. Los autores emplearon cristales de colemanita de muy alta pureza que, luego de ser molidos, conformaron muestras de tamaño  $150 \times 210 \mu$ . Las fracciones más finas ( $-150 \mu$ ) se utilizaron para medidas del potencial Z y los ensayos de absorción. El SDS empleado presenta-

ba una pureza de 98%.

Celik *et al.* (1998) determinaron que la separación de colemanita de las gangas arcillosas montmorilloníticas mediante flotación con SDS en presencia de ión  $Ca^{2+}$  como activador, es mejorada por acción del ultrasonido, provocando la separación de las partículas arcillosas de la superficie de la colemanita, facilitando así la adsorción del reactivo colector.

Güney *et al.* (2000) evaluaron la posibilidad de recuperar la colemanita que se pierde en la fracción fina que se separa durante los procesos de concentración en seco. De esta fracción, con un contenido de  $B_2O_3$  de 18,0%, como colemanita y algo de ulexita, calcita, yeso y montmorillonita como gangas, se obtiene mediante flotación, un concentrado con un contenido de  $B_2O_3$  de 45,2% empleando una mezcla de sulfonatos de petróleo como colector, hidróxido de sodio como regulador de pH, y ácido tánico, cloruro de bario y dextrina como modificadores.

### Separación de impurezas portadoras de arsénico

En la flotación inversa el propósito es flotar las gangas minerales, tales como impurezas con contenido de As y/o Fe, varios tipos de carbonatos o sulfatos, que se recuperan en la espuma quedando el borato en la cola del proceso. Las arcillas son removidas antes del proceso de flotación inversa mediante atrición y deslamado.

Este proceso se ha aplicado a las menas de colemanita, ulexita o tincal, para separar las impurezas de As (principalmente  $AsS$  y  $As_2S_3$ ), seguido al proceso de deslamado con el propósito de remover las arcillas. En el caso de trabajar con minerales de boro solubles, la flotación se realiza utilizando una solución saturada en borato (en lugar de agua) para evitar la pérdida por solubilización. Ozkan y Lyday (1995) detallan un proceso en el cual, un mineral de borato, con alto contenido de impurezas portadoras de As, presentes como sulfuros de arsénico, se prepara en suspensión de mineral al 20-30% (sólido:líquido). Utilizando un alquil-xantato como colector y kerosene o diesel oil como agente modificador, la flotación se realizó al pH natural de la suspensión recuperándose los sulfuros en la espuma y el borato purificado como cola del proceso. En una alternativa semejante, Sawyer y Wilson (1973) patentaron el proceso de remoción de por-

tadores de arsénico mediante flotación de la pulpa caliente (a 95°C), utilizando xantatos y diesel-oil o kerosene como reactivos colectores.

### Colemanita–calcita

Los dos minerales se encuentran frecuentemente juntos en la corteza terrestre. Si la calcita se encuentra junto a la colemanita en la mena, la flotación de la colemanita puede ser dificultosa. En este caso, se hace necesario determinar el grado de liberación de la misma, lo cual permite una evaluación inicial acerca de la factibilidad de aplicar la flotación espumante.

Previo a la flotación puede ser necesario remover las partículas de arcilla del medio; su aparición en grandes cantidades en el circuito de flotación incrementa el tiempo de retención, así como la cantidad de reactivos a emplear.

A partir de una mezcla de ambos, Yarar (1985) obtuvo un concentrado que contenía un 41% de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El autor se propuso determinar por qué el oleato de sodio no es selectivo en la flotación de la pulpa que contiene ambos minerales, mientras que el dodecilsulfonato de sodio es un colector selectivo para la colemanita, observando que:

a) con oleato: a concentraciones del surfactante menores o iguales a 5.10<sup>-6</sup> M, ni la calcita ni la colemanita absorben una cantidad suficiente del surfactante para la flotación. Si la concentración es igual a 10<sup>-5</sup> M, la calcita flotaría adecuadamente mientras que la colemanita está parcialmente recubierta. A concentraciones mayores o iguales a 10<sup>-4</sup> M ambos minerales son colectados.

b) con sulfonato: el surfactante necesita tener una concentración superior a 10<sup>-5</sup> M para que la colemanita flote apreciablemente. A concentraciones mayores o iguales a 10<sup>-4</sup> M la colemanita flota, mientras que la calcita se encuentra parcialmente recubierta.

c) con ambos surfactantes y minerales: se forma una segunda capa de surfactante debido tanto al mecanismo de hemimicelas como a las fuerzas de Van der Waals. Estas fuerzas operan al final de las cadenas hidrocarbonadas de estos surfactantes a una concentración de 10<sup>-3</sup> M. La nueva capa de surfactante formada (ligada débilmente al sustrato) puede dispersarse, quedando únicamente la primera capa (unida fuertemente al sustrato), la cual determina la hidrofobicidad (Yarar, 1985).

### 2.4.3. SEPARACIÓN DE BORATOS ENTRE SÍ

#### Colemanita–ulexita

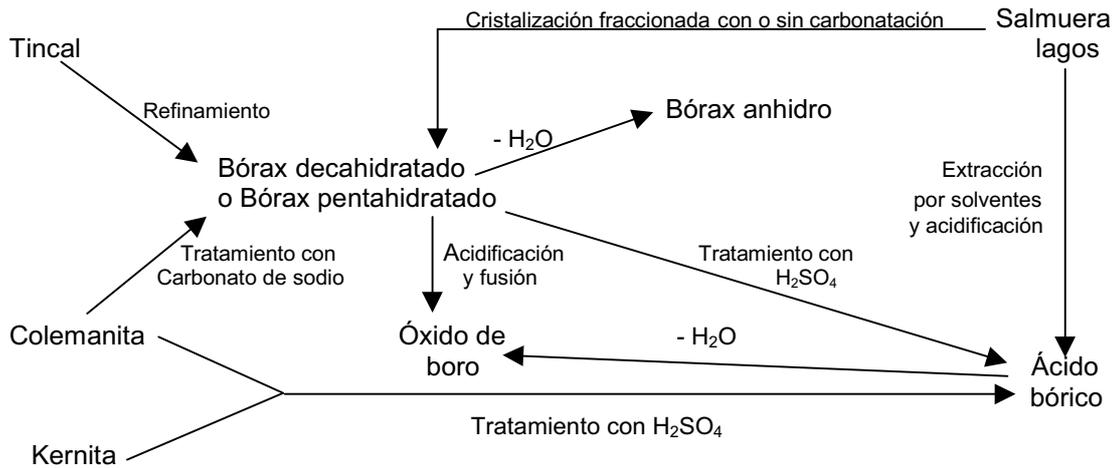
Estos dos minerales se encuentran juntos frecuentemente en la naturaleza. La estructura química que presentan genera problemas en la flotación selectiva de los mismos. Mientras que la colemanita tiene una estructura monoclinica, la ulexita presenta una estructura triclinica. Celik *et al.* (1994) estudiaron las propiedades superficiales de estos minerales de boro, para identificar los mecanismos de absorción de los reactivos de flotación y formular una estrategia para la separación selectiva de estos minerales. Emplearon un surfactante aniónico (dodecilsulfato de sodio-DSS-) para determinar el potencial Z de los minerales. Utilizaron cristales ultrapuros de colemanita y ulexita molidos para obtener una muestra de un tamaño -150+210m destinada a estudios de microflotación. Las fracciones más finas de la molienda se destinaron al medir el potencial Z. El pH natural (9,3) se ajustó mediante HCl e NaOH. Los autores observaron que:

a) La solubilidad de los minerales de boro está determinada por el ión que constituye la red. Para la ulexita, la presencia del ión Na<sup>+</sup> le imparte una mayor solubilidad comparada con la colemanita. La solubilidad de la ulexita (Na y Ca) es de 4,63 g/l a 25°C y la de colemanita (Ca) es de 0,81 g/l. La solubilidad de estos minerales es importante, ya que los iones (en especial los multivalentes) pasan a solución e interaccionan con los agentes surfactantes colectores con una carga opuesta.

b) La colemanita tiene un punto isoeléctrico de 10,5 hallándose su superficie cargada positivamente para valores de pH inferiores a éste, mientras que la ulexita no presenta inversión de su carga superficial negativa en todo el rango práctico de pH, siendo ello la causa de que no se produzca interacción de tipo electrostática con los aniones dodecilsulfato.

c) Debido a las diferencias en el comportamiento electrocinético de ambos minerales, el DSS logra flotar fácilmente la colemanita, pero falla con la ulexita. Este comportamiento permite proponer un esquema de flotación que permita una separación selectiva de colemanita y ulexita a un pH natural de 9,3.

d) El incremento de la temperatura de la pul-



pa por encima de  $40^{\circ}C$  aumenta considerablemente la solubilidad de la ulexita, produciéndose la ionización de la superficie en relación con el  $Ca^{2+}$  que pasa a solución e interacciona con el DSS mejorando, en consecuencia, la flotación de la ulexita (Celik *et al.*, 1994).

## 2.5. PROCESOS DE OBTENCIÓN DE PRODUCTOS PRIMARIOS O INTERMEDIOS.

Los derivados más importantes son ácido bórico, bórax anhidro y óxido de boro. En el esquema se resumen las alternativas para su obtención a partir de distintas materias primas.

### 2.5.1. BÓRAX DECA Y PENTAHIDRATADO

El concentrado de tincal se purifica para obtener bórax decahidratado y su posterior conversión en el pentahidrato. El tincal se disuelve en una solución de bórax caliente ó licor madre ( $94^{\circ}C$ ). Las impurezas remanentes del concentrado de tincal se separan por métodos gravimétricos (arenas por medio de hidroclasificadores) o decantación (con floculación). La solución clarificada conteniendo  $1,8\text{ g/l}$  de  $B_2O_3$  entra a los cristalizadores donde la temperatura se reduce drásticamente y precipitan los cristales de bórax decahidratado a  $60,8^{\circ}C$ , que es la temperatura de transición entre decahidrato y pentahidrato. La misma puede disminuirse por adición de ácido bórico o de hidróxido de sodio, pero en los licores que habitualmente se obtienen, la saturación en sulfato de sodio disminuye esta temperatura a  $49,3^{\circ}C$  y

la de cloruro de sodio a  $39,6^{\circ}C$ . Teniendo en cuenta esta influencia, se fija la temperatura para la precipitación de los cristales de borax decahidratado, tetraborato decahidratado o tincal, recuperándolos del licor remanente mediante centrifugación y posterior secado. De esta manera también puede precipitarse el bórax pentahidratado, tetraborato de sodio pentahidratado ó tincalconita (Smith, 1985; Industrial Minerals, 1999).

Demircioglu y Gülensoy (1977) estudiaron la obtención de bórax a partir de muestras seleccionadas de ulexita, con y sin calcinación previa al ataque con soluciones de  $Na_2CO_3 + NaHCO_3$ . Los autores determinaron que, trabajando con el mineral calcinado, se pueden obtener soluciones más concentradas, siendo menor la temperatura necesaria para la disolución. Observaron también que en las muestras calcinadas, el barro que forman las gangas durante la disolución se filtra más fácilmente.

Retamales *et al.* (1980) estudiaron comparativamente la influencia de soluciones de ( $Na_2CO_3 + NaHCO_3$ ) y  $Na_2CO_3$  sobre la disolución de ulexita, observando que el aumento de la temperatura y de la concentración, para ambas soluciones, aumenta el grado de conversión de la ulexita, determinando además, que la reacción en presencia de bicarbonato alcanza una mayor conversión que en ausencia de él. Este efecto es más pronunciado a bajas temperaturas ( $65^{\circ}C$ ) que a altas ( $110^{\circ}C$ ), siendo probable que la presencia del bicarbonato mejore las condiciones de la reacción al cambiar el pH de la solución.

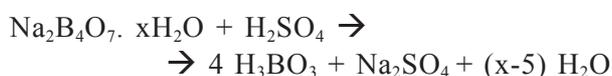
El pentahidrato se produce por calentamiento del bórax en un recipiente cerrado. El bórax se funde en su propia agua de cristalización a  $60^{\circ}C$ , y pierde 5 de sus moléculas de agua por

calentamiento entre 50-100°C. A 160°C pierde otras tres moléculas y recién a una temperatura superior a 400°C pierde las dos últimas, formándose un vidrio al solidificarse por enfriamiento.

### 2.5.2. ÁCIDO BÓRICO

Aunque la mayor parte del ácido bórico se fabrica industrialmente mediante la reacción de concentrados de boratos con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en medio acuoso (bórax, kernita, colemanita, ascarita, ulexita o hidrobóracita), también se lo obtiene a partir de salmuera de lagos.

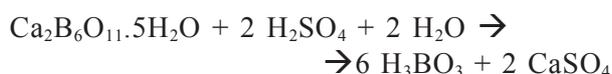
Si se emplea un borato soluble, el proceso se produce de acuerdo a la siguiente reacción:



En EE.UU, la planta US Borax en Boron, California, obtiene el ácido a partir de kernita. El licor con una alta concentración de boro está cerca de la saturación en sulfato de sodio. La solubilidad de este último se mantiene mediante control de pH y a temperatura de 98°C. El licor caliente se filtra para eliminar impurezas insolubles, y el ácido bórico cristaliza en dos etapas usando cristalizadores evaporativos continuos. El primero trabaja a 70°C y el segundo a 35°C. Los cristales obtenidos se filtran y se lavan en contracorriente. El licor remanente con baja concentración de boro y alta concentración de sulfato se calienta y recicla en el proceso, realizándose una purga de sulfato que se separa como sólido (Robert, 1985).

Faith *et al.* (1965) describen un proceso donde 3 partes de bórax en 12 partes de agua caliente requieren cerca de 1 parte de ácido sulfúrico concentrado. Cuando el ácido bórico se enfría, cristaliza y se remueve por filtración.

En Europa se emplea colemanita molida (importada de Turquía) la que reacciona con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 90°C, de acuerdo a la siguiente reacción:



Se utiliza dicha temperatura, debido a la relativamente baja solubilidad del bórico en agua fría (4,95 partes en 100 a 20°C). El sulfato de calcio formado durante la reacción y la ganga insoluble se separan por filtrado. Okur *et al.*

(1992) estudiaron la pérdida de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la torta de filtrado por efecto de una inadecuada molienda de la colemanita previo al ataque sulfúrico, lo cual resulta en una baja velocidad de disolución y altos contenidos de humedad, con la consecuente pérdida de boro en el licor retenido en la torta.

Una alternativa al ataque con ácido sulfúrico de la colemanita es el uso de ácido clorhídrico. Frente a las desventajas operativas que significa el trabajar con ácido clorhídrico, su uso a veces es preferido ya que el ácido sulfúrico se adhiere más tenazmente a los cristales del ácido bórico, obteniéndose un producto más impuro. Además, la formación de cloruro de calcio soluble, en lugar de yeso, permite separar los cristales de ácido bórico sin necesidad de filtrar el licor (para eliminar el yeso formado) previo a la separación de los cristales de ácido bórico. No obstante, por cuestiones de costo, el ácido sulfúrico es generalmente utilizado. Después de la purificación del licor madre, que consiste en eliminar algunas impurezas con resinas intercambiadoras de iones, el mismo se enfría, cristalizando ácido bórico. Los cristales del ácido se separan por centrifugación. Mediante una secuencia de redisolución y recrystalización es factible aumentar la pureza de los cristales del ácido obtenido en el proceso. El licor se recicla al reactor.

Kocakerim y Alkan (1988) estudiaron la disolución de la colemanita, empleando soluciones acuosas saturadas de SO<sub>2</sub>, que procede según la siguiente reacción total:



Específicamente, estudiaron la influencia de la temperatura y el tamaño de partícula en la cinética de la disolución, comprobando que la variación del pH de 0,6 (pH de la solución saturada de SO<sub>2</sub>) a pH 1,1 se debe a la formación de un sistema buffer de ácido sulfuroso-bisulfito. Además, no se forman precipitados ya que el calcio remanente de la disolución de la colemanita permanece en solución.

En Rusia se utilizan boratos de magnesio: ascarita (2 MgO.B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.H<sub>2</sub>O) e hidrobóracita y datolita (CaO.B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2 SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O), un borosilicato. La producción de ácido bórico a partir de concentrados de datolita se realiza allí desde 1961. La mena, conteniendo un 5% de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, es fina-

mente molida y se deja en digestión con ácido sulfúrico. La sílice en el licor madre se coagula calentando a 95°C. La solución resultante de ácido bórico se encuentra casi libre de ácido silícico, luego la suspensión se filtra para separar las impurezas y el licor pasa a cristalizadores de vacío donde se recuperan los cristales de ácido bórico que se lavan y secan adecuadamente. El licor remanente se enriquece y se satura en  $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ , el cual cristaliza por concentración del licor a elevada temperatura; finalmente se separa y el licor remanente se recicla entonces al reactor.

El residuo de este proceso se conoce como “borogypsum” y se usa como agente ligante o mejorador de suelos (Alexeev y Chernyshov, 1997).

En Argentina, el proceso para la obtención de ácido bórico se realiza por ataque sulfúrico sobre concentrados de ulexita. Dicho ataque se lleva a cabo a temperatura, y el licor caliente contiene ácido bórico, sulfato de sodio y cloruro de sodio (solubles), y sulfato de calcio y demás materiales insolubles que acompañan al mineral. Éstos se separan en un tanque decantador luego de agregar un floculante para facilitar la sedimentación de los barros. El licor clarificado pasa a la etapa de cristalización donde se recuperan los cristales de ácido bórico.

En Searles Lake, California, el bórax se encuentra presente en las salmueras de dicho lago en concentraciones de 1,5% en bórax anhidro, junto a otras sales. La separación selectiva del bórax de la mena, se lleva a cabo empleando una extracción líquido-líquido. El bórax se extrae en un solvente insoluble en agua, como el kerosene, usando un poliol aromático (ej. el 3-cloro, 2-hidroxi, 5-isooctil-metanol benceno) que compleja el ión borato. Posteriormente, la fase orgánica se aísla y acidifica con ácido sulfúrico, dando una solución acuosa de ácido bórico y sulfato de sodio. Luego de concentrar por evaporación, el licor se enfría cristalizando el ácido. En todos los casos descritos, el ácido bórico obtenido es conocido también como ácido ortobórico.

Otro ácido del boro, el ácido metabórico ( $\text{HBO}_2$ ), puede ser producido por deshidratación del ortobórico a una temperatura superior a 130°C.

### 2.5.3. ÓXIDO DE BORO

La producción comercial de óxido de boro, algunas veces denominado también ácido bórico anhidro, es mediante deshidratación del ácido

bórico. Los hornos usados son similares a los empleados para la producción de bórax anhidro, aunque las temperaturas de los mismos son levemente inferiores, y el producto fundido es algo menos corrosivo para los ladrillos refractarios del horno.

La empresa U.S. Bórax ha patentado un proceso que genera el óxido por medio de la reacción directa de bórax con ácido sulfúrico a una elevada temperatura, evitando la obtención del ácido bórico como intermedio.

También es posible preparar el óxido de boro calentando pentaborato de amonio y haciéndolo reaccionar con amoníaco y agua.

Doonam y Lower (1978) describen el mecanismo para producir óxido de boro de elevada pureza a un bajo costo, el cual elimina la necesidad del uso de ácido bórico refinado.

Una mezcla de bórax y ácido sulfúrico se lleva a un horno donde el óxido de boro fundido y el sulfato de sodio se separan a una temperatura superior a 750°C. El material que se decanta contiene 96-97% de óxido de boro y dicha pureza es suficiente para muchas aplicaciones (Grayson, 1985; Ozkan y Lyday, 1995).

### 2.5.4. BÓRAX ANHIDRO

El bórax anhidro se produce a partir de su forma hidratada ( $5 \text{H}_2\text{O}$  ó  $10 \text{H}_2\text{O}$ ) mediante fusión. La calcinación es usualmente un paso intermedio en este proceso. En la empresa Kerr-McGee de Estados Unidos, el bórax decahidratado se deshidrata parcialmente en calcinadores de 2,4 m de diámetro y 21,3 m de longitud. Los calcinadores se alimentan con bórax y con aire caliente a 700-815°C que sale del horno de fusión de inducción directa.

Durante el proceso de calcinación se generan partículas de polvo que son arrastradas por los gases de salida. Estas partículas son retenidas en su mayor proporción en un ciclón separador, y las remanentes en un lavador de gases. El agua del lavador recircula por el mismo y en parte se recircula como agua de proceso en la planta de bórax. Las partículas de polvo retenidas en el ciclón separador, se añaden a la descarga del calcinador, ingresando luego al horno de fusión por medio de un tubo cilíndrico que introduce el material en el fondo del horno. El fondo del mismo presenta en su parte externa tubos por donde circula agua fría; la temperatura en el fondo es inferior, permitiendo que se mantenga

una “cama” de bórax sin fundir. La misma protege el refractario del horno ya que el bórax fundido es altamente corrosivo. Así, el material fundido sale rápidamente del horno a medida que se va formando el líquido. La temperatura en la parte superior del horno de fusión oscila entre 1200-1440°C y en la zona de fusión es de 980°C. Como ya fue mencionado, los gases que salen del horno son enviados a los calcinadores por tubos de 1,2 m de diámetro.

El bórax anhidro comercial es amorfo ya que se obtiene por enfriamiento rápido del material fundido. El material cristalino se forma por enfriamiento lento. Así se obtienen cristales ortorómbicos en su forma  $\mu$ , que es la más estable. La forma cristalina puede romperse fácilmente, a diferencia del material amorfo que es mucho más abrasivo. Para producir el primero de ellos, el bórax fundido se coloca en moldes que circulan en una cinta continua. El bórax caliente permanece en dichos moldes durante un largo tiempo hasta su cristalización; los lingotes se rompen posteriormente. Para producir bórax anhidro amorfo, el material fundido se enfría rápidamente al pasar por entre dos grandes cilindros refrigerados con agua fría, formando hojas de aproximadamente 1,6 mm de espesor. Posteriormente, se muelen y se tamizan obteniendo el tamaño de partículas deseado. El material, aun-

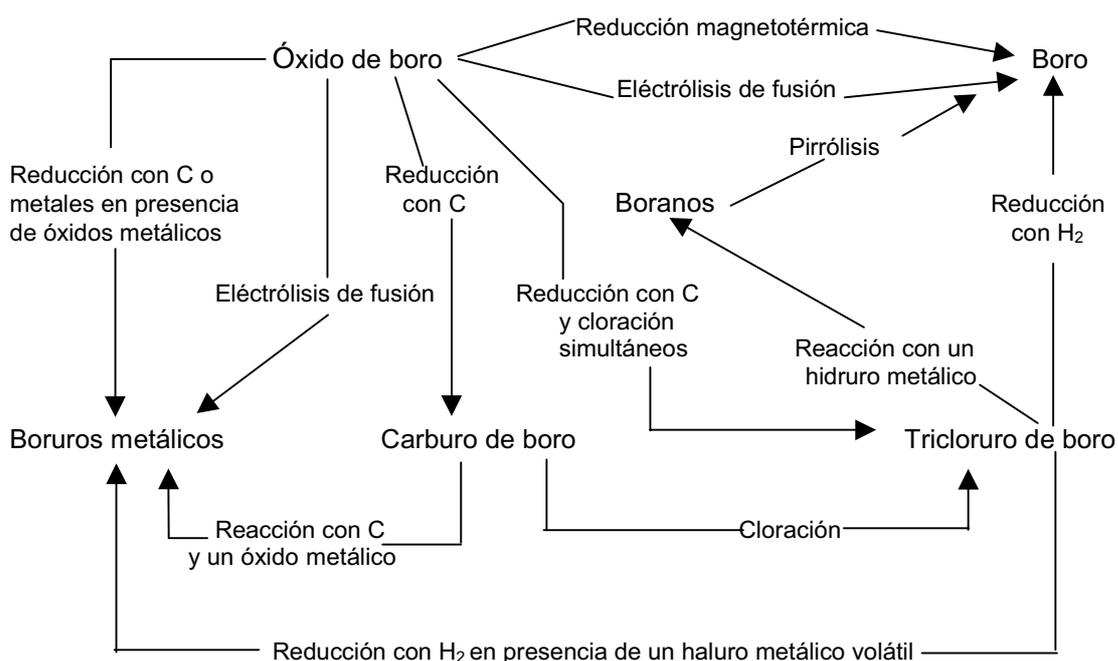
que amorfo, puede contener algunos cristales de bórax cristalino (Grayson, 1985).

### 2.5.5. TRICLORURO DE BORO

Stipp y Sehreck (1961) detallan la obtención de tricloruro de boro por reacción de los reactivos en un sistema de tres reactores de lecho fluido en serie. En un primer lecho, se carga en forma continua carbón y ácido bórico, además del reciclo de la mezcla que sale del tercer lecho fluidizado. El aire que se introduce mantiene el lecho fluido, se produce la oxidación del carbón y la masa se calienta a 800-900°C, descomponiendo el ácido bórico en el óxido y en vapor de agua. La mezcla pasa por un segundo lecho fluido y luego, en el tercer lecho, se introduce cloro, formándose el tricloruro que se recupera del efluente gaseoso formado.

## 2.6. BORUROS METÁLICOS Y ALEACIONES DE BORO

El boro se combina con la mayoría de los metales o forma aleaciones con los mismos. Dependiendo de ciertas características básicas, principalmente el radio atómico relativo, los productos pueden ser ricos en metales (habitualmente aleaciones) o ricos en B (usualmente com-

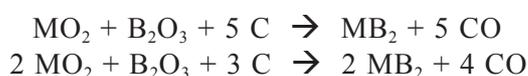


puestos estequiométricos). Los metales de los grupos IV-V forman principalmente diboruros (ej.  $TiB_2$  o  $CrB_2$ ), los cuales son extremadamente duros, presentan una alta conductividad eléctrica, altos puntos de fusión y, además, son resistentes al ataque de metales fundidos casi en su totalidad.

En la fabricación de aleaciones, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones: a) la ausencia de impurezas deletéreas; y b) la estequiometría de la reacción, aunque un alto contenido de B es deseable.

Los métodos empleados habitualmente para la fabricación de boruros son los siguientes: a) reducción carbotérmica, es decir, una co-reducción de un óxido metálico y del óxido de boro con carbón a elevada temperatura; b) reducción del óxido metálico con carbón en presencia de carburo de boro o del boruro del otro metal (ej.  $CaB_6$ ); y c) reducción de un óxido metálico y del óxido de boro mediante Al o Mg.

Los dos primeros métodos indicados se emplean para preparar grandes cantidades de boruros. Las reacciones involucradas en los mismos son las siguientes:



La mayoría de los diboruros pueden prepararse mediante éstos dos métodos, los cuales son similares en cuanto al calentamiento a  $2000^\circ C$  de una mezcla del óxido metálico junto con la fuente de boro y el carbón, donde el producto resultante es un polvo fino. Alternativamente, la mezcla puede calentarse en una cama fluidizada en donde Ar es el gas fluidizante.

Para la preparación de boruro de zirconio, se emplea el mismo mecanismo indicado, empleándose silicato de zirconio, ácido bórico y carbón; la mezcla se calienta en un horno y el Si evoluciona a SiO.

En el tercer método indicado, donde Al y Mg son los reductores habituales, representa la forma más simple y económica de obtener boruros, pero los productos resultantes no presentan el mismo grado de pureza. Se utiliza para obtener boruros de Cr y W.

En las tres reacciones indicadas, es importante mantener una atmósfera inerte (o de hidrógeno), ya que a la temperatura de reacción la

mayoría de los boruros metálicos reacciona con  $O_2$ ,  $N_2$ , CO o  $CO_2$ . Por otra parte, si bien es posible preparar los boruros a partir de sus respectivos elementos, este proceso está limitado, dado el alto costo del boro, a los boruros de las tierras raras que se emplean en la industria electrónica o en investigación (Ryan, 1968).

## 2.7. SALES Y SOLUCIONES ACUOSAS DE BORATOS

Las soluciones diluídas de boratos contienen sólo especies monoméricas. Aquellas soluciones de ácido bórico que tienen una concentración menor a 0,1 M contienen moléculas de ácido bórico monoméricas,  $B(OH)_3$ , y las soluciones de las sales de los metaboratos presentan iones metaborato.

Las soluciones que son mezcla de ácido bórico y de sales de metaboratos contienen una mezcla de  $B(OH)_3$  y de iones  $B(OH)_4^-$ .

A concentraciones mayores a 0,1 M se forman aniones boratos poliméricos. Sumados a las especies monoméricas indicadas, se agregan una serie de poli-iones como  $B_3O_3(OH)^{-4}$ ,  $B_3O_3(OH)^{-5}$ ,  $B_5O_6(OH)^{-4}$ , y  $B_4O_5(OH)^{-4}$ . Todas estas especies ingresan rápidamente en un equilibrio dinámico, y su distribución depende del radio, la relación molar  $Na_2O:B_2O_3$ , la temperatura y la concentración de la sal del borato, aunque es independiente del catión involucrado.

### 2.7.1. BORATOS DE METALES ALCALINOS Y DE AMONIO

Acerca de su fabricación, en el caso de los boratos de amonio y de metales alcalinos, el tetraborato de potasio tetrahidratado se prepara a partir de una solución acuosa de KOH y ácido bórico, empleando una relación  $B_2O_3 / K_2O$  de 2, o también, puede prepararse mediante separación de una solución de KCl-bórax.

La misma preparación rige para el pentaborato de potasio, pero la diferencia radica en la relación  $B_2O_3 / K_2O$  que es de 5.

El tetraborato de amonio tetrahidratado se prepara mediante cristalización a partir de una solución acuosa de ácido bórico y amonio con una relación  $B_2O_3 / (NH_4)_2O$  de 1,8-2,1. Dicha relación es de 5 en la fabricación del pentaborato de amonio. También puede fabricarse mediante

precipitación a partir de una mezcla de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -bórax.

### 2.7.2. OTROS BORATOS METÁLICOS

En general, los boratos hidratados de metales pesados se preparan mezclando soluciones acuosas o suspensiones de los óxidos metálicos, sulfatos o haluros con ácido bórico o boratos de metales alcalinos (ej. bórax). Los boratos de metales anhídridos pueden prepararse calentando las sales hidratadas a 300-500°C, o mediante fusión directa del óxido metálico con ácido bórico u óxido de boro.

En el caso del metaborato de bario, se conocen cuatro formas hidratadas que responden a la fórmula  $\text{BaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ . Las formas penta y tetrahidratadas cristalizan cuando soluciones de  $\text{BaCl}_2$  y metaborato de sodio se combinan a temperatura ambiente. Ambos pierden el agua de hidratación a temperaturas superiores a 140°C. También puede prepararse a partir del sulfuro de bario, el cual se obtuvo mediante una reducción previa del sulfato de bario. La presencia de impurezas de sulfuro en el producto puede afectar ciertas aplicaciones del producto.

Los metaboratos de cobalto y cobre precipitan cuando se agrega bórax a las soluciones acuosas de los sulfatos o cloruros de dichos metales con número de oxidación 2.

El tetraborato de manganeso cristalino,  $\text{MnB}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , se prepara empleando como intermediario el hexaborato  $2\text{MnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , el que se forma cuando el bórax se añade a una solución acuosa de  $\text{MnSO}_4$ . El tetraborato cristaliza cuando una cantidad estequiométrica de ácido bórico se agrega a una suspensión agitada del hexaborato.

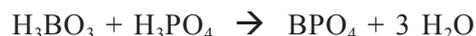
Para los boratos de cinc, se conoce una serie de compuestos hidratados desarrollados durante los últimos 60 años. El más común de ellos es el  $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , el que se forma cuando el bórax se agrega a las sales solubles de cinc. Otros compuestos hidratados, cuyas fórmulas aproximadas son  $\text{ZnO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y  $3\text{ZnO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , se deshidratan por calentamiento a 130-250°C.

Cuando reaccionan  $\text{ZnO}$  y ácido bórico a temperaturas de 90-100°C, se forma otro hidrato cristalino,  $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ . Este compuesto presenta la particularidad de retener el agua de hidratación por debajo de 250°C, y se

ha cristalizado de soluciones conteniendo bórax,  $\text{ZnCl}_2$ , e  $\text{NaOH}$ .

### 2.7.3. FOSFATO DE BORO

Este compuesto se prepara a partir de la deshidratación de mezclas de ácido bórico y ácido fosfórico a 1200°C, de acuerdo a la siguiente reacción:



La deshidratación completa requiere temperaturas superiores a 1000°C. El fosfato obtenido bajo condiciones normales de presión y temperatura, presenta una estructura de bipirámides tetragonales.

Otros compuestos hidratados del fosfato de boro, las formas tri, tetra, penta y hexa, se descomponen rápidamente en agua para dar soluciones (Smith, 1985; Grayson, 1985).

## 2.8. TOXICOLOGÍA Y SALUD

Los compuestos de boro tienen una baja toxicidad para el hombre y otros mamíferos. Los distintos boratos de sodio, el ácido bórico y el óxido de boro no están presentes en concentraciones importantes en el aire, y se ubican en la misma categoría de riesgo que el polvo ambiental. Si son ingeridos, manifiestan una moderada toxicidad, aunque 15-30 g de bórax o 2-5 g de ácido bórico provocan la muerte. Sin embargo, otros informes señalan que se han administrado altas dosis en terapias de radiación (para tumores cerebrales) sin severos efectos tóxicos.

A mediados de los años 50, los boranos se utilizaron en programas de investigación para su uso en combustibles de aviones. Se registraron unos pocos casos de intoxicación aguda debido a la inhalación en plantas industriales. Los boranos son altamente tóxicos, produciendo una severa irritación al sistema nervioso central.

Otro compuesto, el trifluoruro de boro, presenta riesgos para los trabajadores de la industria química, debido a su uso como catalizador. Las evidencias preliminares indican que el riesgo proviene de los compuestos organo-fluorados formados con el ión fluoruro, más que del trifluoruro en sí mismo.

El ferroboro y las aleaciones maestras de

boro son, generalmente, no tóxicas, pero se sugiere tomar medidas de precaución (ej. el uso de barbijos, guantes y anteojos protectores para el ácido bórico) en el manejo de materiales crudos.

Okay *et al.* (1985) llevaron adelante un estudio que consistió en investigar varios métodos de remoción del boro de las aguas de drenaje de las menas Bigadic en el río Simav (Turquía). Los resultados experimentales mostraron que, tanto el método de adsorción usando MgO como los métodos de intercambio iónico, fueron efectivos en remover el boro de las aguas de drenaje. La celulosa como adsorbente tiene una eficiencia mínima. El MgO puede emplearse efectivamente en una relación Mg/B de 20 para 3 ciclos de lavado con una efectividad del 85%, pero debe ser descargado luego del tercer ciclo. De cualquier modo, el consumo del óxido para este propósito, vuelve antieconómico este proceso. El uso de una resina específica para el boro, la llamada Amberlita IRA-743, libre de aminas, es también antieconómica debido a lo costoso de las etapas de regeneración.

Como fue señalado, el boro es un nutriente esencial para las plantas. Se agrega a los fertilizantes en niveles traza; sin embargo, el agregado en cantidad superior a la concentración necesaria, afecta al ser humano y a los animales y se vuelve tóxica para los vegetales (Absalom, 1979; Grayson, 1985; Baudis y Fichte, 1985; Smith, 1985).

## 2.9. BIBLIOGRAFÍA

- ALEXEEV, V.P.; CHERNYSHOV, A.V., 1997. "Boron in the CIS. An overview of deposits and production". *Industrial Minerals*, Agosto: 49-53.
- AYTEKIN, Y.; BADRUK, M., 1992. "Beneficiation of Emet colemanite ore by decrepitation". *Proceedings of 4th International Mineral Processing Symposium, Antalya, Turquía*: 549-562.
- CELEDA, A.M.; MATTENELLA, L., 2001. "Ensayos preliminares de separación electrostática colemanita-hidrobórica". Comunicación interna.
- CELIK, M.S.; SAGLAM, H.; HANCER, M., 1992. "Activation mechanisms of barium ions in colemanite flotation". *Proceedings of I International Mineral Processing Symposium, Izmir, Turquía*: 203-212.
- CELIK, M.S.; BULUK, R.; ONAL, G., 1994. "Selective separation of colemanite from ulexite by flotation". *Flotation. Proceedings of The IV Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology; and III Latin-American Congress on Froth Flotation. Volume II. Concepción, Chile*: 197-205.
- CELIK, M.S.; YASAR, E., 1995. "Effect of temperature and impurities on electrostatic separation of boron minerals". *Minerals Engineering. Vol 8 (7)*: 829-833.
- CELIK, M.S.; BATAR, T.; AKIN, Y.; ARSLAN, F., 1998. "Upgrading schemes for boron minerals through calcinations". *Minerals and Metallurgical Processing. February*: 53-56.
- CELIK, M.S.; ELMA, I.; HANCER, M.; MILLER, J.D., 1998. "Effect of in-situ ultrasonic treatment on the floatability of slime coated colemanite". *Proceedings of 7th International Mineral Processing Symposium, Estambul, Turquía*: 153-158.
- DELICE, S.; GUNDUZ, M.; OZKAN, S.G., 1998. "Recovery studies of ulexite ores from Eti-Holding Bigadic mine". *Proceedings of 7th International Mineral Processing Symposium, Estambul, Turquía*: 291-294.
- DEMIRCIOGLU, A.; GÜLENSOY, H., 1977. "The yield studies in the production of borax from the Turkish ulexite ores". *Chimica Acta Turcica*, 5: 83-91.
- DOONAM, D.J.; LOWER, L.D., 1978. "Boron Compounds". *Encyclopedia of Chemical Technology. Wiley & Sons*: 67-110.
- DUBLANC, E., 1991. "Boratos: minerales industriales". *Panorama Minero. Septiembre-October*: 11-16.
- ERIC, R. H., 1987. "Laboratory-scale calcination parameters of colemanite concentrate". *Pyrometallurgy 1987. Institution of Mining and Metallurgy, London*. 363-387.
- ERKAL, F.; GIRGIN, I., 1992. "Etibank Emet Kolemanit Isletmesi Kaba Artiklarinin Konsantr Uretim Amaciyla Degerlendirilmesi". *Proceedings of*

- 4th International Mineral Processing Symposium, Antalya, Turquía: 599-608.
- FAITH, W.L.; KEYES, D.B.; CLARK, R.L., 1965. "*Boric Acid*". Industrial Chemical, 3<sup>rd</sup>.Edition. Wiley & Sons: 158.
- GRAYSON, M., 1985. "*Boron compounds*". Encyclopedia of Glass, Ceramics, Clay and Cement. John Wiley & Sons: 91-140.
- GÜNEY, A.; ÖNAL, G.; KAYTAZ, Y., 2000. "*A new aspect to beneficiation of the colemanite tailings*". Environmental Improvements in Mineral Processing and Extractive Metallurgy. Sánchez, Vergara y Castro (Ed.). Universidad de Concepción. Vol II.
- KAYTAZ, Y.; ONAL, G.; GUNNEY, A., 1986. "*Beneficiation of Bigadic colemanite tailings*". Proceedings of I International Mineral Processing Symposium, Izmir, Turquía: 238-249.
- KOCACAKERIM, M.M.; ALKAN, M., 1988. "*Dissolution kinetics of colemanite in SO<sub>2</sub> saturated water*". Hydrometallurgy, 19: 385-392.
- SMITH, R., 1985. "*Boric oxide, boric acid and borates*". Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol A4: 263-280.
- OKAY, O.; GUCLU, H.; SONER, E.; BALKAS, T., 1985. "*Boron pollution in the Simav river, Turkey and various methods of boron removal*". Water Research, 19 (7): 857-862.
- OKUR, E.; CELIK, M. S.; ONAL, G., 1992. "*Borik Asit Uretiminde Ogutme-filtrasyon Kosullarini Optimizasyonu*". Proceedings of 4th International Mineral Processing Symposium, Antalya, Turquía: 812-821.
- OZKAN, S.G.; LYDAY, P.A., 1995. "*Physical and chemical treatment of boron ores*". Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Colorado, EEUU.
- POCOVI, R.; LATRE, A.; KOWK LEUNG, H.; BLASCO, D.; BONINI, M., 1994. "*Flotación por espumas de boratos*". III Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. San Luis, Argentina: 113-116.
- RETAMALES, L.; CORREA, E. A.; YÁÑEZ, R., 1980. "*Estudio cinético de las reacciones: ulexita-carbonato-bicarbonato de sodio, ulexita-carbonato de sodio*". Contribuciones Científicas y Tecnológicas N°40. Área Ingeniería Química III. Dpto. de Ingeniería Química. Universidad Técnica del Estado, Santiago de Chile.
- RYAN, W., 1968. "*Non-ferrous extractive metallurgy in the United Kingdom*". The Institution of Mining and Metallurgy (Ed.): 25-29.
- SAWYER, D.L.; WILSON, M., 1973. "*Flotation of arsenic minerals from borate ores*". US-Patent. 3, 768, 738.
- SENER, S.; ÖZBAYOGLU, G., 1992. "*Determination of calcinations parameters of ulexite and possibility of separation from colemanite*". Proceedings of 4th International Mineral Processing Symposium, Antalya, Turquía: 538-548.
- SENER, S.; ÖZBAYOGLU, G., 1995. "*Separation of ulexite from colemanite by calcinations*". Minerals Engineering, Vol 8 (6): 697-704.
- SENER, S.; ÖZBAYOGLU, G., 1998. "*Effect of heat treatment on grindability of ulexite*". Proceedings of 7th International Mineral Processing Symposium, Estambul, Turquía: 29-31.
- STIPP, H.E.; SCHRECK, V., 1961. "*Boron*". Mineral Yearbook, 349-360.
- YARAR, B., 1985. "*The surface chemical mechanism of colemanite-calcite separation by flotation*". En: Barker, J. y Lefond, S. (Ed.). Borates: economic geology and production: 221-233.

## Capítulo 3

### MATERIALES Y PRODUCTOS QUÍMICOS A BASE DE BORO

#### 3.1. APLICACIONES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los boratos minerales se han utilizado en una gran gama de aplicaciones durante mucho tiempo, al menos desde el siglo VIII, cuando se los usó como fundente para ensayar y refinar oro y plata. Sus valiosas propiedades estimularon un rápido comercio internacional de estos minerales. Marco Polo menciona haber transportado boratos chinos desde el Tíbet hasta Europa, y Venecia fue el principal centro de importación y uso durante la Edad Media (Kistler y Helvací, 1994).

Los compuestos del boro y sus aplicaciones son amplias y muy variadas. No sólo se emplean en la producción de vidrios borosilicatados, donde se adiciona 12-15% m/m de  $B_2O_3$  que imparte un bajo coeficiente de dilatación, sino también como agentes fundentes en porcelanas esmaltadas y cerámicas vidriadas. Este mercado abarca un 10% del consumo total en Estados Unidos. Cerca de un 5% se utiliza en agricultura. El boro es un nutriente traza necesario para las plantas y se agrega en pequeñas cantidades a diversos fertilizantes. Los boratos se usan también en el riego de campos para reponer rápidamente la deficiencia de boro. Cuando se aplican boratos en concentraciones relativamente altas actúan como herbicidas no selectivos. Esta aplicación emplea un 2-3% del consumo total.

En la fabricación de aleaciones y refractarios se emplean pequeñas cantidades de boratos. Se utilizan como retardantes de la combustión en plásticos y en materiales celulósicos. Los boratos son, por otra parte, absorbentes de neutrones en reacciones nucleares.

#### 3.2. COMPUESTOS OXÍDICOS

##### Óxido de boro

El óxido de boro, también conocido como trióxido de diboro, anhídrido bórico o ácido bórico anhidro, existe en forma vítrea y en dos formas

cristalinas. La forma vítrea no tiene color, es sólida y se prepara habitualmente por deshidratación del ácido bórico. La forma cristalina más común es la forma hexagonal (o alfa) y cristaliza a 200-250°C a presión atmosférica. Una forma menos común es la monoclinica (o beta) que cristaliza a 4000 MPa y 600°C (Smith, 1985).

##### *Propiedades físicas, químicas y usos*

La forma vítrea de  $B_2O_3$  es de muy difícil obtención en un estado completamente anhidro, aún cuando se calienta a temperaturas superiores a 1000°C. Muchas propiedades físicas de este compuesto son muy sensibles a la presencia de agua residual. En la tabla se indican algunas propiedades físicas de este compuesto.

El óxido de boro fundido disuelve a la mayoría de los óxidos metálicos a temperaturas superiores a 1000°C. Esto se debe al carácter fundente del  $B_2O_3$  a dicha temperatura, el cual conserva su superficie metálica limpia y, por consiguiente, vulnerable al ataque del oxígeno del aire. Sólo las aleaciones de molibdeno y níquel son resistentes a la corrosión por debajo de dicha temperatura, mientras que el carburo de silicio lo es por encima de los 1200°C.

<b>Propiedades físicas del óxido de boro vítreo</b>	
Densidad a 0°C	1,8766 g/cm <sup>3</sup>
a 18-25°C	1,844 g/cm <sup>3</sup>
a 500°C	1,648 g/cm <sup>3</sup>
a 1000°C	1,528 g/cm <sup>3</sup>
Índice de refracción (a 14,4°C)	1,463
Viscosidad a 350°C (en cP)	10,60
a 700°C	4,96
a 1000°C	4,00
Punto de ebullición (extrapolado)	2316°C
Calor latente de vaporización a 1500 K	390,4 KJ/mol <sup>-1</sup>
a 298 K	431,4 KJ/mol <sup>-1</sup>

Fuente: Grayson, 1985

La reducción del  $B_2O_3$  a elevadas temperaturas por medio de Al, Mg y otros metales alcalinos produce  $B_{12}O_3$  y otros subóxidos de este metal. A  $900^\circ C$  el carbón reacciona con  $B_2O_3$  en una atmósfera de nitrógeno para formar nitruro de boro. De igual modo, este compuesto se obtiene hacien-

do reaccionar  $B_2O_3$  con  $NH_3$  a  $600-900^\circ C$ .

El  $B_2O_3$  es higroscópico a temperatura ambiente, y el producto comercial contiene casi 1% de ácido bórico, presente como una capa superficial. La reacción con ácido sulfúrico produce  $H[B(HSO_4)_4]$  (Grayson, 1985; Smith, 1985).

ÓXIDO DE BORO	
USOS	OBSERVACIONES
Industria del vidrio y de la cerámica	Casi la mitad de su producción se emplea en estas industrias en los Estados Unidos. Su empleo incluye vidrios borosilicatos, fibras de vidrio aislantes, fibras de vidrio textiles, esmaltes de porcelanas y cerámicas satinadas. El vidrio borosilicato contiene 12-15% de $B_2O_3$ proveniente, en su mayor parte, de bórax pentahidratado. El óxido de boro en los vidrios modifica el coeficiente de dilatación, la resistencia química, la velocidad de flujo, la devitrificación, y las propiedades ópticas (entre ellas, incrementa el índice de refracción). En Europa Occidental la mitad de la producción se emplea en la fabricación de productos relacionados con el vidrio. En Japón dicho porcentaje asciende al 70%.
Como catalizador	Es un catalizador ácido en muchas reacciones orgánicas.
Como fundente	Muy importante para preparar muchos tipos de vidrio, fritas, barnices, recubrimientos cerámicos y porcelanas esmaltadas. El mayor uso se encuentra en la industria de la fibra de vidrio, donde este óxido se emplea en la producción de filamentos de bajo contenido de sodio, requerido para reforzar los plásticos con dichas fibras.
Otras aplicaciones	Es un intermediario importante en la producción de haluros de boro, ésteres, carburos, nitruros y boruros metálicos. Un 4% se emplea como boratos solubles en la agricultura (como fertilizantes) para compensar las deficiencias de B en los suelos; también se usa como herbicida en altos dosajes. El B está implicado en la división celular, en la formación de frutos, en el metabolismo del agua y de carbohidratos, en la síntesis de proteínas, y en el desarrollo de semillas en las plantas. La ausencia de este micronutriente provoca un desarrollo pobre de la raíz, de la fotosíntesis, de los frutos, y de la producción de semillas. (Grayson, 1985; Smith, 1985; Harben, 1999; Harris, 2001).

### Ácido Bórico

Este ácido puede ser considerado como un hidrato del óxido bórico, y existe tanto como trihidrato -el ácido ortobórico-, y como monohidrato, el ácido metabórico ( $HBO_2$ ). El nombre de ácido bórico está usualmente asociado al del ácido ortobórico, el cual es el único compuesto comercialmente importante.

#### *Propiedades físicas, químicas y usos*

La solubilidad del ácido bórico en agua se incrementa por el agregado de sales tales como KCl,  $KNO_3$ , RbCl,  $K_2SO_4$  y  $Na_2SO_4$ , mientras que la adición de LiCl, NaCl y  $CaCl_2$  tiende a disminuirla. Se comporta como un ácido débil en

soluciones acuosas ( $pK_a$  9,23 a  $25^\circ C$ ), disminuyendo su pH a medida que la concentración crece. El pH también se incrementa con la temperatura.

El ácido bórico es completamente soluble en muchos solventes orgánicos. Algunos de estos solventes (ej. piridina, dioxano, dioles) forman complejos con el ácido. Generalmente, el ácido es demasiado débil para titularlo directamente. El uso de un agente complejante (ej. manitol) intensifica la acidez del bórico, permitiendo su titulación; se emplea fenolftaleína como indicador.

Reacciona con bases fuertes formando el ión metaborato  $B(OH)_4^-$  y con alcoholes para formar ésteres. El ácido bórico reacciona con el ión  $F^-$  para formar el ácido tetrafluorobórico  $H(F_3BOH)$ , el cual puede ser destilado a presiones reducidas (Grayson, 1985; Smith, 1985).

<b>ÁCIDO BÓRICO</b>	
<b>USOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Compuestos a base de boro	Diversos compuestos químicos, a base de boro, se preparan directamente a partir del ácido bórico. Estos incluyen fosfatos de boro, sales de boratos inorgánicas, sales sintéticas, fluoboratos, ésteres de boratos y aleaciones metálicas tales como ferroboro.
Catalizador	El ácido cataliza la oxidación de cadenas hidrocarbonadas, incrementando la producción de alcoholes, formando ésteres que previenen la posterior oxidación de grupos oxhidrilos a cetonas y ácidos carboxílicos.
Industria del vidrio	El ácido bórico o el borato de sodio (sin calcio o con un bajo contenido del mismo) dan lugar a un tipo especial de vidrios borosilicatos con una alta resistencia química y un bajo coeficiente de expansión térmica, denominados comercialmente <i>Pyrex</i> . Los mismos se emplean en vajillas para cocción doméstica, en fibra de vidrio, vidrios para la industria farmacéutica y química. El ácido bórico o los boratos de Na y de Ca, se pueden usar en fibras de vidrio aislantes (usadas, principalmente, como aislante térmico en construcciones nuevas), y el ácido bórico o el borato de calcio (sin Na o con un bajo contenido del mismo) se emplean en fibras de vidrio textiles conteniendo un 6-8% de $B_2O_3$ .

<b>BÓRAX ANHIDRO</b>	
<b>USOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Vidrios y cerámicas	En estas industrias el bórax anhidro encuentra su mayor aplicación. Se emplea en la fabricación de vidrio, reemplazando en la formulación al $B_2O_3$ y al $Na_2O$ . También en fibra de vidrio aislante, vidrios borosilicatos, y esmaltados.
Otras aplicaciones	En esmaltes y fritas, en fertilizantes, como fundente en metalurgia y como retardante del fuego. Se emplea también en la fabricación de refractarios y abrasivos, como absorbente de neutrones en reacciones nucleares, como alguicida en la industria del agua, y como anticongelante (Grayson, 1985; Crick, 1996; Smith, 1985).

### 3.3. PRODUCTOS QUÍMICOS A BASE DE BORATOS DE SODIO

#### 3.3.1. BORATOS DE SODIO

##### **Bórax Anhidro ( $Na_2B_4O_7$ )**

El bórax anhidro posee 45% más de  $B_2O_3$  y  $Na_2O$  que el bórax pentahidratado y 90% más de los mismos compuestos citados que el bórax decahidratado. Se disuelve en agua formando una solución saturada, aunque lo hace dos veces más lentamente que el pentahidratado y el decahidratado. La razón es que la forma anhidra debe primero hidratarse y luego disolverse. El compuesto fundido ataca la mayoría de los materiales refractarios a  $800^\circ C$ . Reacciona con carbón a  $1200^\circ C$  en ausencia de  $O_2$  para formar  $B_4C_3$  y  $Na_2C_2$ , y reacciona con Na metálico para formar B elemental (Crick, 1996; Smith, 1985).

##### **Tetraborato disódico decahidratado (Bórax decahidratado) ( $Na_2O \cdot 2B_2O_3 \cdot 10H_2O$ )**

Este compuesto de boro es, posiblemente, el más conocido. Es fácilmente soluble en agua, sus soluciones son ligeramente alcalinas y forman soluciones búffer; el pH de 9,2 es independiente de la concentración y de la temperatura. El bórax decahidratado es estable a temperatura ambiente, pero en corriente de aire o a altas temperaturas, pierde parte o toda su agua de cristalización. Una solución acuosa a  $10^\circ C$  contiene 3,34 % m/m.

Comercialmente está disponible en forma de polvo, cristales y en forma granular. En grado técnico posee un porcentaje de pureza de 99,5%.

En Estados Unidos casi la totalidad del bórax refinado se emplea en productos para la limpieza de casas. El bórax decahidratado se usa en cosméticos y productos de tocador, donde se requiere elevada

pureza. En pequeñas cantidades se emplea en fertilizantes y herbicidas. El bórax decahidratado, en un elevado grado de pureza, se usa en capacitores electrolíticos, aplicaciones nucleares y en laboratorios químicos (Grayson, 1985; Ryan, 1968; Harris, 2001).

#### **Tetraborato disódico tetrahidratado** ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

Cerca del 30% de este producto refinado se usa en fertilizantes en Estados Unidos. Se emplea en fibras de vidrio, vidrios y herbicidas. En menor porcentaje, tiene aplicaciones en anticongelantes, cerámicos esmaltados y en agentes de limpieza. Se utiliza, además, en la producción de ácido bórico.

#### **Octaborato disódico tetrahidratado** ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

Encuentra su aplicación en compuestos para preservar maderas, *sprays* fertilizantes, herbicidas, y retardantes del fuego.

#### **Pentaborato de sodio pentahidratado** ( $\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

Tiene aplicaciones en *sprays* para la agricultura y en retardantes del fuego.

#### **Metaborato de sodio tetrahidratado y dihidratado** ( $\text{NaBO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y $\text{NaBO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

Los metaboratos de sodio forman parte de compuestos empleados en la industria textil (limpieza, apresto y terminado), adhesivos y detergentes. Se emplean también en muchas aplicaciones fotográficas (en especial en la industria química). En agricultura, se utilizan tanto en herbicidas como en *sprays* fertilizantes. El dihidrato se ve menos afectado por el calor (Grayson, 1985; Smith, 1985).

### 3.3.2. BORATOS DE AMONIO Y DE POTASIO

#### **Tetraborato dipotásico tetrahidratado** ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

Este compuesto se emplea para reemplazar al bórax en aquellas aplicaciones donde se necesita un borato de un metal alcalino, pero no pueden usarse sales de sodio o, también, donde se requiere una forma más soluble. Tiene aplicaciones como solvente para

la caseína, como un constituyente en procesos de soldaduras, como lubricante y como componente de soluciones de tipo diazo (Grayson, 1985; Smith, 1985).

#### **Pentaborato de potasio tetrahidratado** ( $\text{KB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

Encuentra aplicaciones en procesos de soldadura de aceros inoxidable y de metales no ferrosos (Grayson, 1985; Smith, 1985).

#### **Tetraborato diamónico tetrahidratado**

Reemplaza a boratos de metales alcalinos, presentando también una alta solubilidad. Su uso principal es como agente neutralizante en la fabricación de resinas de urea-formaldehído, y como un ingrediente en formulaciones resistente a las llamas (Grayson, 1985; Smith, 1985).

#### **Pentaborato de amonio tetrahidratado**

Es un componente de electrolitos en capacitores electrolíticos, un ingrediente en formulaciones de compuestos resistentes a las llamas, y en recubrimientos de papel (Grayson, 1985; Smith, 1985).

### 3.3.3. BORATOS DE CALCIO

Los boratos de este metal se emplean, en general, como fundentes en la industria metalúrgica. Se usan también en la fabricación de refractarios y abrasivos y como absorbente de neutrones en reacciones nucleares.

#### **Hexaborato dicálcico pentahidratado** ( $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

La colemanita se usa en la producción de ácido bórico y bórax. Se lo utiliza también en la fabricación de fibra de vidrio textil, la que se emplea en plásticos reforzados. Además, se usa como agente escoriificante en la fabricación de acero. Se lo emplea en algunos retardantes de la combustión y como un precursor en algunas aleaciones de boro.

#### **Ulexita** ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) y **Probertita** ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

Encuentran aplicación en la fabricación de fibra de vidrio aislante y vidrios borosilicatos, como así también en la fabricación de otros boratos.

### 3.3.4. OTROS BORATOS METÁLICOS

#### Metaborato de bario ( $\text{BAO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ )

Se conocen, al menos, cuatro hidratos. Estos compuestos cristalizan cuando las soluciones de cloruro de bario y metaborato de sodio se combinan a temperatura ambiente. La presencia de impurezas de sulfuro en el producto puede tornar inadecuado al metaborato para algunas aplicaciones.

Este compuesto se emplea como un aditivo en productos retardantes del fuego. Brinda resistencia a los mohos (antihongos) en pinturas látex, plásticos, textiles, papel y en colas de pegar basadas en proteínas (Grayson, 1985; Smith, 1985).

#### Boratos de cobalto y cobre

El metaborato de cobre hidratado ( $\text{CuO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) se utilizó como funguicida para el tratamiento de maderas y otros materiales celulósicos. El tetraborato de cobalto ( $\text{CoB}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) se comercializa como un catalizador ácido.

#### Meta y tetraboratos de litio

Se utilizan en la fabricación de vidrio (Smith, 1985).

#### Tetraborato de manganeso

Se comercializan dos boratos de manganeso ( $\text{MnB}_4\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) los que se emplean como secadores de tintas de impresión.

#### Boratos de cinc

En los últimos 50 años se han desarrollado una serie de boratos de cinc hidratados para su uso como aditivos retardantes del fuego en recubrimientos y polímeros. Un alto porcentaje de este compuesto se utiliza en plásticos vinílicos, donde los boratos de cinc se agregan solos o en combinación con otros retardantes del fuego como el óxido de antimonio.

Cuando reaccionan óxido de cinc y ácido bórico a  $80\text{-}90^\circ\text{C}$ , se forma un borato de cinc cristalino hidratado. Este compuesto presenta una alta estabilidad térmica, propiedad muy atractiva para su uso en aditivos retardantes del fuego para plás-

ticos.

Debido a que todos los boratos de cinc son escasamente solubles en agua y en solventes orgánicos, se los utiliza finamente divididos (2-10 mm).

## 3.4. MATERIALES A BASE DE COMPUESTOS NO OXÍDICOS

### Boruros

Los boruros poseen características metálicas y propiedades muy particulares. Los boruros de metales de los subgrupos IVA, VA y VIA, los compuestos  $\text{MB}_6$  de los grupos II y III, y los boruros de Al y Si presentan altas conductividades eléctrica y térmica, altos puntos de fusión, gran dureza, bajos coeficientes de expansión térmica y una buena estabilidad química.

Los boruros tienen un importante uso potencial en el control y el manejo de metales fundidos y sus escorias, donde la corrosión y la resistencia a la erosión son muy importantes (por ej. en los barcos). El principal uso de los diboruros metálicos es como material componente de los crisoles, especialmente para metales no ferrosos, como ser: Al, Mg, Zn, Pb y Sn.

Los diboruros de Ti y Zr son potenciales cátodos en la producción electrolítica de Al mediante el ciclo de Hall-Héroult.

Los hexaboruros de La y Ce tienen aplicación industrial como cátodos en dispositivos electrónicos debido a sus altas emisividades térmicas y a sus resistencias al envenenamiento. El primero se emplea, además, en dispositivos electrónicos de alta emisividad electrónica. Por otra parte, el tiempo de vida de los electrodos de La supera en dos órdenes de magnitud a los cátodos de tungsteno.

Un amplio uso tienen el NiB, CrB y el  $\text{CrB}_2$  en la producción de una aleación para soldaduras, basada en Ni-Cr-B y Si llamada *Colmonoy*.

Se sugirió el uso del hexaboruro de Eu (un material refractario) como un absorbente de neutrones en reactores.

La dureza y el bajo costo que presentan los boruros, facilita su uso como finos recubrimientos en superficies metálicas, preparadas previamente mediante el proceso denominado *Boron-Izing* (la introducción de B dentro de las capas de acero y otros materiales ferrosos mediante  $\text{B}_4\text{C}$  en polvo) (Grayson, 1985; Schwetz y Lipp, 1985).

### Boro-hidruros

Los compuestos típicos de esta serie son: diborano ( $B_2H_6$ ), un gas; pentaborano ( $B_5H_9$ ), un líquido; y decaborano ( $B_{10}H_{14}$ ), un sólido. Los boro-hidruros son reductores químicos muy activos. El boro-hidruro de sodio ( $NaBH_4$ ) se comercializa en forma de polvo o de *pellet*.

### Nitruro de boro (BN)

El nitruro de boro es un sólido de color blanco, tiene una densidad de  $2,25 \text{ g.cm}^{-3}$ , presenta una superficie cerosa y es altamente refractario. Este compuesto producido en forma de fibras, no sólo iguala a la fibra de vidrio en su resistencia a la tracción, sino que es más liviano y más resistente a las altas temperaturas. Cuando es sometido a alta presión y temperatura, el nitruro de boro forma cristales cúbicos, cuya dureza compite con la del diamante.

El boro y el nitrógeno forman el nitruro de boro en la relación 1:1, el cual puede existir en tres formas: a)  $\alpha$ -BN, es una modificación hexagonal con una estructura en capas similar al grafito, algunas veces denominada “grafito blanco”; b)  $\beta$ -BN, es la forma cúbica y c)  $\gamma$ -BN, el cual presenta una forma hexagonal densa con una estructura tipo wurtzita.

La forma  $\alpha$ -BN es la variedad más común y la más empleada ya que tiene una baja densidad ( $2,27 \text{ g.cm}^{-3}$ ); es estable a temperaturas cercanas a los  $3000^\circ\text{C}$ ; es inerte químicamente, especialmente a ácidos y metales fundidos; inerte al aire a temperaturas superiores a  $1000^\circ\text{C}$  y a gases como  $N_2$ , CO y Ar a temperaturas superiores a  $2700^\circ\text{C}$ ; es estable al choque térmico; presenta una alta conductividad eléctrica y presenta también una baja conductividad térmica, lo que lo hace un excelente aislante térmico.

La forma  $\beta$ -BN es la forma cúbica y comercialmente se la conoce como Borazon. Es similar al diamante en cuanto a su estructura cristalina y a otras propiedades. La forma beta pura no tiene color y es un buen aislante eléctrico. El agregado de compuestos tales como  $Li_3N$ , o de elementos tales como Be, Si, C o P cambia no sólo su color, sino también otras propiedades, como ser su conductividad o la dureza. La densidad teórica de esta forma es  $3,48 \text{ g.cm}^{-3}$  y su dureza Knoop es aproximadamente 4700.

La forma  $\gamma$ -BN (o wurtzita) es metaestable a la presión y temperatura a la que se fabrica, y tiene una densidad cercana a la de la forma cúbica. A una presión superior a 5,5 GPa y  $1300^\circ\text{C}$  se transforma en la variedad cúbica.

Las principales propiedades mecánicas y térmicas de la forma  $\alpha$ -BN son las siguientes:

<b>Propiedades mecánicas</b>	
Dureza – Knoop ( $\text{kgf.mm}^{-2}$ )	280
Módulo de tracción (GPa)	20-35
Resistencia a la compresión (MPa)	30-120
<b>Propiedades térmicas</b>	
Calor específico a $25^\circ\text{C}$ ( $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ )	800-2000
Conductividad térmica a $20^\circ\text{C}$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	15-50
Dilatación térmica, $20$ - $1000^\circ\text{C}$ ( $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	1,0-36
Punto de sublimación ( $^\circ\text{C}$ )	2600-2800
Temperatura máxima de utilización continua ( $^\circ\text{C}$ )	950-2500

Fuente: [http://www.goodfellow.com/static/S/B\\_60.HTML](http://www.goodfellow.com/static/S/B_60.HTML)

### Carburo de boro ( $B_4C$ )

Se forma por reacción entre el coque y el ácido bórico o  $B_2O_3$  a  $2600^\circ\text{C}$ . Pertenece al importante grupo de materiales duros no metálicos junto con alúmina, carburo de silicio y diamante. Es un material altamente refractario y uno de los compuestos de mayor dureza conocidos (14 en la escala de Mohs extendida), sólo inferior al diamante y al nitruro de

boro cúbico. Es uno de los compuestos más estables conocidos. Presenta una alta resistencia al ataque químico. No se disuelve en ácidos minerales ni en compuestos alcalinos. Lo descompone, lentamente, una mezcla mixta de ácido sulfúrico-ácido fluorhídrico o ácido nítrico-ácido fluorhídrico. Su composición comercial presenta una estequiometría B:C de 4:1. Presenta una densidad de  $2,51 \text{ g.cm}^{-3}$ , su punto de fusión está cer-

<b>NITRURO DE BORO</b>	
<b>FORMA</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
$\alpha$ -BN (hexagonal)	<p>La forma alfa tiene una gran variedad de usos en distintos campos como ser química, metalurgia, tecnología de altas temperaturas, electrotecnia y electrónica.</p> <p>En forma de polvo se emplea en lubricantes sólidos para cojinetes y es un aditivo para aceites y grasas que trabajan a altas temperaturas. Se usa como relleno para gomas, resinas y plásticos, en agentes de transmisión a muy elevadas presiones, en recubrimientos para moldes de grafito a altas presiones y también sirve como un agente intermediario para la preparación de otros compuestos de boro. Depositado pirolíticamente, tiene una alta resistencia química y es impermeable (insensible) al He. Esta variedad se comercializa también en forma de suspensión acuosa para recubrimientos y también en la forma de <i>spray</i>. También se comercializa en forma de fibras para determinadas aplicaciones.</p> <p>En formas prensadas en caliente se utiliza en crisoles para metales y vidrios fundidos, en componentes para hornos eléctricos, en partes estructurales de dispositivos magneto-hidrodinámicos y en dieléctricos para antenas de radar. Se emplea en aislantes para equipos de alta y baja frecuencia. En reactores nucleares como absorbente de neutrones. En moldes para cerámicos tipo <math>B_6O</math> o <math>B_{6,5}O</math>. Es un aislante para hornos de plasma, generadores de pulso de arco y para motores de iones. En tubos protectores y enchufes aislantes para termocuplas. Su bajo coeficiente de expansión térmica lo hace muy resistente al shock térmico.</p>
$\beta$ -BN (cúbica)	<p>La mayor aplicación es como abrasivo bajo el nombre de <i>Borazon</i>, en forma de pequeños cristales cuyos tamaños van de 1 a 300 <math>\mu m</math> (para mayores detalles véase “<i>Abrasivos</i>” Publicación Técnica N°7 SEGEMAR-UNSAM, 2001). Dado que esta forma es el material de mayor dureza conocido luego del diamante, tiene aplicaciones en tareas de perforación y en maquinarias. Está aumentando su uso en herramientas de corte para aceros y superaleaciones basadas en níquel.</p>
$\gamma$ -BN (wurtzita)	<p>Se emplean en herramientas de corte, las cuales tienen una larga vida útil (Grayson, 1985; Absalom, 1979; Goodfellow.com/static/S/B_60.HTML; Schwetz y Lipp, 1985).</p>

cano a 2450°C, y su coeficiente de dilatación térmica es de  $5.10^{-4} \text{C}^{-1}$ .

Sus aplicaciones principales aprovechan sus excelentes propiedades de resistencia al desgaste, así como su tenacidad. De allí que se utiliza tanto como abrasivo (para mayores detalles ver “*Abrasivos*” Publicación Técnica N°7 SEGEMAR-UNSAM, 2001) como en boquillas. Específicamente, el acoplamiento para el paso de diámetro de tubo a boquilla guía al abrasivo hacia el orificio de salida, de forma que minimiza las pérdidas por fricción y el desgaste de la pared de la boquilla.

Por su baja densidad, alto módulo de elasticidad y elevada resistencia a la compresión se lo utiliza como material balístico. Un 20% del boro natural es el isótopo  $^{10}B$  que otorga al carburo de boro una sección transversal de captura de neutrones elevada. Por lo tanto, se emplea en

aplicaciones de absorción de dichas partículas en reactores nucleares. Se comercializa en escalas de alta pureza (75 a 80% de B) (Schwetz y Lipp, 1985; Grayson, 1985; [www.concentric.net/~ctkang/b4c.shtml](http://www.concentric.net/~ctkang/b4c.shtml); [www.mpa.es/productos/accesorios/boquillas](http://www.mpa.es/productos/accesorios/boquillas); [www.goodfellow.com/static](http://www.goodfellow.com/static); Absalom, 1979).

### 3.5. ALEACIONES HIERRO-BORO

Existe una variedad de aleaciones hierro-boro denominadas *Ferroboro*, conteniendo de 0,2 a 24% de boro, que se utilizan en la industria siderúrgica para introducir pequeñas cantidades de este metal en aceros especiales. El agregado de pequeñas cantidades de boro, entre 5 y 15 ppm (valor máximo 30 ppm), mejora la dureza de las aleaciones, ya que intensifica la dureza de otros

<b>CARBURO DE BORO</b>	
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Dureza - Knoop ( kgf.mm <sup>-2</sup> )	2800-3500
Dureza - Vickers ( kgf.mm <sup>-2</sup> )	3200
Módulo de Tracción ( GPa )	440-470
Resistencia a la Compresión ( Mpa )	1400-3400
Resistencia a la Tracción ( MPa )	350
<b>Propiedades térmicas</b>	
Calor específico a 25°C ( J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	950
Conductividad térmica a 20°C ( W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	30-90
Dilatación térmica, 20-1000°C ( x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	5,6
Temperatura máxima de utilización continua (°C)	600-800

Fuente: [www.goodfellow.com/static/S/B\\_61.HTML](http://www.goodfellow.com/static/S/B_61.HTML)

<b>CARBURO DE BORO</b>	
<b>USOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Basados en la dureza	El mayor uso es como polvo abrasivo. Comercialmente, están disponibles en tamaño de partículas comprendidos entre 1 µm a 10000 µm, los cuales se emplean como agentes de limpieza de materiales de elevada dureza, muy especialmente, carburo de tungsteno y cerámicas finas. Como sustituto para polvos sueltos puede usarse una pasta de carburo de boro, la cual puede soportar temperaturas superiores a 350°C. Se emplea también como agente de resistencia al uso en piezas de ingeniería, también en toberas (para mayores detalles, véase "Abrasivos" Publicación Técnica N°7 SEGEMAR-UNSAM, 2001). Las sustancias de gran dureza son no dúctiles. Este factor junto con una densidad de sólo 2,5 g.cm <sup>-3</sup> facilita el uso del carburo de boro como placas cerámicas. Tiene aplicación en instrumentos de navegación.
Tecnología nuclear	El carburo de boro es más económico y más fácil de fabricar que el boro mismo. Como consecuencia, presenta un uso casi exclusivo en materiales que deben protegerse de la emisión de neutrones. En ambientes (por lo general, laboratorios) donde existe radiación ambiental, se colocan placas de B <sub>4</sub> C en puertas, ventanas, o paredes.
En química	En polvo, se emplea para introducir B por difusión en las capas superficiales de aceros y otros materiales ferrosos, resultando en la formación de una fina y muy resistente capa (10-1000 µm) de Fe <sub>2</sub> B. El alto contenido de B en el B <sub>4</sub> C facilita su uso como material crudo para la fabricación de otros compuestos de boro, incluyendo los haluros y los boruros metálicos. El elevado calor de combustión del carburo de boro facilita la utilización de los polvos del mismo, con un tamaño de partículas de 2 µm, en propelentes sólidos para cohetes.
Otros usos	Las propiedades termoeléctricas del B <sub>13</sub> C <sub>2</sub> lo convierten en un material interesante para la conversión termoeléctrica a altas temperaturas. Los termoelementos hechos de la cupla B <sub>4</sub> C-C pueden emplearse para medir temperaturas superiores a los 2300°C (Schwetz, K. y Lipp, A., 1985).

elementos constituyentes como ser C, Mn, Cr, Mb, etc. En estas aleaciones es importante mantener el B protegido del O<sub>2</sub> y el N<sub>2</sub>, debido a su alta afinidad hacia los mismos. Por lo tanto, es necesario una buena desoxidación usando Ca, Al o Si, y una denitrificación por Ti o Zr.

En las aleaciones de acero inoxidable de tipo Cr-Ni, el uso de B en un porcentaje de 0,004 a 0,009 %, mejora significativamente la ductilidad del material en el rango 950-1250°C. Aceros con

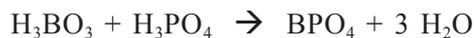
un contenido de B superior a 2,5 % se emplean en varillas de control usadas en reactores nucleares. El boro se usa también en aleaciones resistentes a la abrasión, ej. *Colmonoy*, una aleación conteniendo Ni-Cr-Si-B, la que contiene más de un 3% de B; *Stellite*, una aleación resistente a la abrasión a base de Co-Cr-W conteniendo más de 2,5 % de B.

Existe un nuevo campo de uso del B en la producción de aleaciones amorfas o vidrios me-

tálicos. La empresa Allied Chemical Corp. ha estado llevando a cabo un desarrollo intensivo de estas aleaciones. Las mismas consisten de un metal de transición (Fe, Ni o Co) y cerca de 20% de un metaloide (B, C, Si o P). Exhiben propiedades físicas extraordinarias, especialmente magnéticas y se emplean en ciclos de histéresis (Grayson, 1985; Baudis y Fichte, 1985).

### 3.6. FOSFATO DE BORO

El fosfato de boro es un sólido blanco que vaporiza lentamente a una temperatura superior a 1450°C, con una aparente descomposición. Se lo prepara, habitualmente, por deshidratación completa de mezclas de ácido bórico y ácido fosfórico a una temperatura mayor a 1200°C.



La principal aplicación ha sido como catalizador (sólo o con sílice), de manera tal que, a menudo, no se requiere un alto grado de pureza.

También, se ha descrito el uso de fosfato de boro como un fundente en porcelanas feldespáticas, pero no se han desarrollado aún aplicaciones a escala comercial. También se lo emplea en vidrios ópticos y como opalizador (Grayson, 1985; Ryan, 1968).

### 3.7. BIBLIOGRAFÍA

- ABRASIVOS, 2001. Publicación Técnica SEGEMAR - UNSAM. N°7, Septiembre.
- ABSALOM, S., 1979. "Boron". Mineral Commodity Profiles. Bureau of Mines, United States Department of the Interior. May.

- BAUDIS, U.; FICHTE, R., 1985. "Boron and Boron Alloys". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A4, 5th Edition: 281-291.
- CRICK, J. E., 1996. "Anhydrous and hydrated borax compared". Glass Production Technology International: 35-36.
- GRAYSON, M., 1985. "Boron compounds". Encyclopedia of Glass, Ceramics, Clay and Cement. John Wiley & Sons: 91-140.
- HARBEN, P., 1999. "Borates". En: The Industrial Minerals HandyBook III: A guide to markets, specifications & prices: 35-39.
- HARRIS, P., 2001. "A field day for minerals". Industrial Minerals: 411, 53-61.
- KISTLER, R.; HELVACI, C., 1994. "Boron and Borates". Industrial Minerals & Rocks. Carr, D. (Ed.). 6<sup>th</sup> Edition: 171-184.
- RYAN, W., 1968. "Non-Ferrous extractive metallurgy in the United Kingdom". The Institution of Mining and Metallurgy (Ed.), 25-29.
- SCHWETZ, K.; LIPP, A., 1985. "Boron Carbide, Boron Nitride, and Metal Borides". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A4, 5th Edition: 295-307.
- SMITH, R., 1985. "Boric Oxide, Boric Acid, and Borates". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A4, 5th Edition: 263-280.

#### SITIOS EN INTERNET:

- [www.concentric.net/~ctkang/b4c.shtml](http://www.concentric.net/~ctkang/b4c.shtml)  
[www.goodfellow.com/static/S/B\\_61.HTML](http://www.goodfellow.com/static/S/B_61.HTML)  
[www.goodfellow.com/static/S/B\\_60.HTML](http://www.goodfellow.com/static/S/B_60.HTML)  
[www.mpa.es/productos/accesorios/boquillas](http://www.mpa.es/productos/accesorios/boquillas)

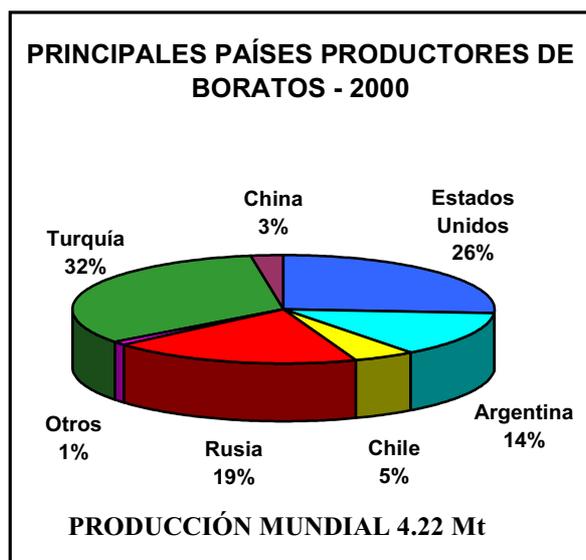
## Capítulo 4

### INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LOS BORATOS

#### 4.1. PRODUCCIÓN Y CONSUMO

La producción de boratos se encuentra limitada a unos pocos países en los continentes americano y asiático. Argentina, Bolivia, Chile, Estados Unidos y Perú producen boratos en occidente mientras que China, Kazakhsan, Rusia, Turquía e India en oriente.

Los principales países consumidores de boratos son europeos, que a falta de producción satisfacen su demanda vía importación. Los mayores países importadores son: España, Francia, Italia y Alemania (The Industrial Minerales HandyBook III, 1999)



La gran variedad de usos que tienen los boratos hace de esta commodity un producto muy utilizado en la industria. Las principales industrias que consumen boratos son las del vidrio y

cerámica. El precio de los boratos está directamente relacionado con el costo de producción. El mayor costo es el combustible utilizado para el secado, deshidratado y fundido de los minerales para obtener las materias primas requeridas por la industria (Kistler and Helvaci, 1994).

La producción de boratos y sus productos derivados, en el año 2000, alcanzó 4,27 millones de toneladas (Mt) y con respecto a 1999 la producción se redujo 4.47% (200.000 t). La oferta mundial está liderada por Turquía (33%), Estados Unidos (26%), Rusia (19%), Argentina (14%), Chile (5%), China (3%), y unos pocos países que no superan el 1% de participación cada uno. Las reservas a escala mundial son 470 Mt, consideradas adecuadas para el nivel de consumo actual (Lyday, 2000).

Turquía posee los principales yacimientos de boratos, con reservas estimadas de 150 Mt y su producción para el año 2000 fue 1.4 Mt permaneciendo constante con respecto al año anterior. El volumen exportado de boratos naturales fue 540.000 t para 1998 con un máximo en 1995 de 683.600 toneladas. La producción se basa en los minerales de bórax, colemanita, y ulexita.

Estados Unidos produjo 1.12 Mt durante el año 2000, un 8,5% menos que en 1999. Las reservas indicadas son cercanas a los 80 Mt y sus volúmenes exportados alcanzaron 500.000 toneladas. La U.S. Bórax (USA) lidera en el ámbito mundial la producción y comercialización de boratos. Principalmente exporta bórax, ácido bórico, colemanita, y ulexita.

En Sudamérica, Argentina y Chile son los principales productores de boratos, con 580.000 t y

**Principales productores mundiales (miles de toneladas)**

Países	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Argentina	245	342	423	350	360	350
Chile	211	149	171	280	200	200
China	295	157	136	137	110	110
Estados Unidos	1.190	1.150	1.190	1.170	1.220	1.120
Turquía	1.144	1.447	1.569	1.650	1.410	1.400
Rusia	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Otros Países	85	85	81	73	80	40
<b>Total Mundial</b>	<b>4.170</b>	<b>4.330</b>	<b>4.570</b>	<b>4.660</b>	<b>4.380</b>	<b>4.220</b>

Fuente: Minerals Yearbook, 2000

200.000 t respectivamente. Según datos de 2000, la Argentina se ubicaba como tercer productor mundial de boratos de sales, después de Turquía (1.400.000 t) y USA (1.120.000 t).

El ácido bórico, representa dentro del mercado mundial, un producto que debe diferenciarse de los boratos naturales. Los países que exportan ácido bórico son los siguientes: USA, Chile, Francia, Italia, Turquía, Argentina, Bolivia y Perú y los países que importan ácido bórico son: Japón, Alemania, Francia, Bélgica, Reino Unido, Italia, España, Holanda, Taiwán, Corea, Canadá y México.

#### 4.2. PRODUCCIÓN EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

La producción de boratos en el año 2000, representó el 2,27% del total de la producción minera argentina y aproximadamente el 10% de la producción de minerales no metalíferos. La producción se desarrolló en las provincias de Salta (74%), Jujuy (25%) y Catamarca (1%), con un total producido de 580.000 t, representando \$24.998.000.

La Argentina presenta una evolución favorable en lo que respecta a la producción de boratos.

En la década del '70, el comportamiento de la producción mostró una tendencia creciente con un valor mínimo para 1970 de 43.346 t y un máximo en 1979 de 132.655 toneladas. Dicho crecimiento, permaneció en la década siguiente, ya que la producción se mantuvo en niveles muy superiores a la anterior. El mínimo volumen producido fue 113.123 t en 1983 y el máximo de 269.574 t en 1988.

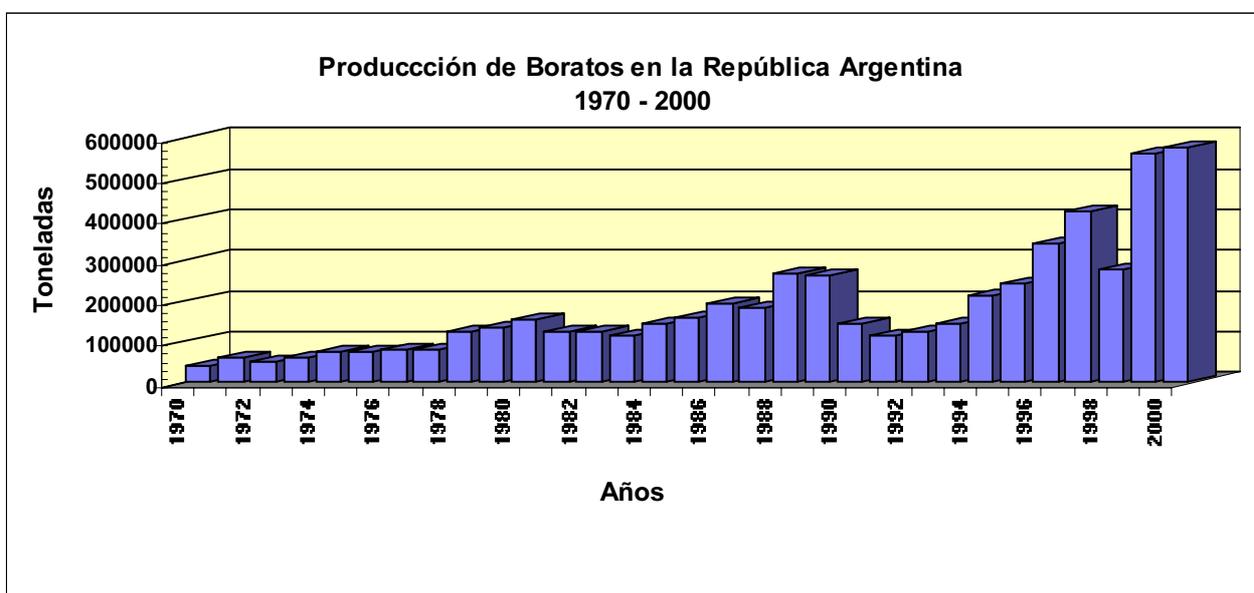
Desde 1990 hasta 1997, la producción tuvo un incremento debido a cierta expansión en las industrias. Esta expansión fue el resultado de una política económica que benefició las exportaciones. A partir de 1999, se revierte esta situación, con un alza en la participación de un 23%. Este aumento en la producción es consecuencia de la puesta en marcha de nuevos proyectos y su orientación a mercados externos.

No obstante, en 1998 la tendencia se revirtió, con una caída del 34,5% en la producción respecto al año anterior, como consecuencia del contexto macroeconómico.

Provincias	1996	1997	1998	1999	2000
Salta	196.016	249.560	204.943	s/d	s/d
Jujuy	137.916	172.996	70.479	s/d	s/d
Catamarca	8278	--	1.389	s/d	s/d
<b>Total</b>	<b>342.210</b>	<b>422.556</b>	<b>276.811</b>	<b>565.647 e</b>	<b>580.000 e</b>

e: estimado. s/d: sin dato

Fuente: Estadística Minera de la República Argentina.



### 4.3. POLÍTICA ARANCELARIA

La posición arancelaria a través de la cual ingresan y egresan los boratos a los países, de acuerdo a la nomenclatura NALADISA, se presenta en el siguiente listado:

#### Boratos Naturales

2528.10.00	Boratos de sodio naturales y concentrados incluidos calcinados
2528.90.00	Los demás boratos naturales

#### Boratos derivados

2810.00.10	Ácido Ortobórico
2810.00.90	Los demás óxidos de boro, ácidos bóricos
2840.11.00	Bórax refinado, anhidro
2840.19.00	Bórax refinado, los demás
2840.20.00	Los demás boratos
2840.30.00	Peroxoboratos

Fuente. Dirección de Economía Minera y Desarrollo

### 4.4. COMERCIO EXTERIOR

El análisis del comercio exterior de boratos se realizara diferenciando los *boratos naturales* del producto *ácido bórico*, ya que ambos revis-

ten importancia en el intercambio comercial.

En la actualidad dada la política de apertura comercial y la necesidad de incrementar las exportaciones argentinas, los boratos naturales y sus productos derivados no están gravados por ningún arancel.

En el caso de las importaciones los aranceles deben diferenciarse de acuerdo a si las mismas tienen como origen países del MERCOSUR (INTRAZONA) o si están originadas en terceros países (EXTRAZONA). Las importaciones de boratos, por su parte, están gravadas con un 4%, arancel vigente para todos los países del MERCOSUR. El ácido bórico, por su parte, presenta un gravamen de un 10%, arancel vigente para todos los países del MERCOSUR

#### 4.4.1. EXPORTACIÓN

La República Argentina es un país exportador de boratos y sus productos derivados. Más del 50% de sus exportaciones se dirigen a países del MERCOSUR, en especial Brasil.

El período 1995-2000 muestra un aumento del 90% en las exportaciones, con un promedio de 61.500 t anuales. El mayor volumen se registró en 2000, con 74.714 t equivalentes a FOB U\$S 17,7

#### Exportación de Boratos (toneladas)

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Australia	12.780	13.049	6.117	70	187	616
Brasil	18.879	29.427	47.000	41.000	43.100	53.500
Chile	--	--	--	--	--	108
España	--	9.695	10.500	14.000	9.800	7587
Portugal	--	--	1.045	597	--	1739
Uruguay	5.991	--	109	--	--	--
Otros	1.492	2.141	5.509	14.733	7.244	11.154
Total	39.142	54.312	70.280	70.400	60.331	74.714

Fuente: INDEC

#### Exportación de Ácido Bórico (toneladas)

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Australia	1.002	861	861	871	798	595
Brasil	6.670	9.041	8.353	8.586	9.620	9.953
Canadá	--	410	420	273	489	232
India	--	--	--	728	356	335
Italia	--	582	117	110	6	28
Países Bajos	--	441	63	--	83	--
Reino Unido	--	389	42	3	20	--
Sudáfrica	--	273	230	420	147	116
Uruguay	567	25	263	--	28	56
Otros	--	--	237	168	612	813
Total Ácido Bórico	9.649	12.022	10.683	11.159	12.159	12.125

Fuente: INDEC

millones. Brasil es el principal mercado para los boratos argentinos, con un porcentaje creciente del 46% en 1995 al 71% en 2000. Por otra parte, las exportaciones a Australia, Uruguay y España han sufrido una importante caída con respecto a años anteriores.

Las exportaciones de ácido bórico en el período 1995-2000 muestran un promedio de 11.100 t anuales de exportación con un aumento del 26%. El mayor volumen de exportación se registró en 1999 con 12.159 t equivalentes a FOB U\$S 5,5 millones. Brasil absorbió el 79% de las ventas argentinas al exterior, y fue seguido por Australia con un 7% y Canadá con un 4%.

#### 4.4.2. IMPORTACIÓN

Las importaciones de boratos por parte de la Argentina no representan volúmenes significativos. El máximo volumen importado fue de 356 t en 1998, proveniente de Estados Unidos (99%)

y España (1%).

Las importaciones de ácido bórico también son poco significativas. Cerca del 30% de nuestras compras provienen de Chile, el 60% de Estados Unidos y el restante 10% tiene su procedencia en países europeos. El volumen máximo comercializado fue de 957 t en 1997 por un valor CIF dólares de 442.350, el origen de las mismas: Chile (42%), USA (49%) y Países Bajos (9%).

#### 4.5. CONSUMO APARENTE

El consumo aparente de boratos se mantiene en constante crecimiento, y esta íntimamente relacionado con la producción de ácido bórico. En 1996 el incremento fue de 39,85% de boratos y productos derivados respecto del año anterior. Por lo tanto dicho aumento acompaña la tendencia positiva en las exportaciones de ácido bórico, principal consumidor de boratos.

**Importación de Boratos (toneladas)**

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Bolivia	--	--	--	25	--	--
Chile	--	60	--	331	--	--
España	2	--	--	--	2	2
Nueva Zelanda	--	--	--	--	--	20
USA	118	2	26	--	--	--
Total	120	63	26	356	2	22

Fuente: INDEC

**Importación de Ácido Bórico (toneladas)**

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Alemania	--	--	2	2	--	2
Bélgica	8	5	--	--	--	--
Brasil	--	--	--	--	--	22
Chile	75	305	408	106	130	120
Hong Kong	--	--	--	17	--	--
Países Bajos	--	--	81	--	--	--
USA	216	546	466	391	196	235
Total Ácido Bórico	299	856	957	516	367	379

Fuente: INDEC

**Consumo Aparente de boratos**

Años	Producción (t)	Exportación (t)	Importación (kg)	Consumo Aparente(t)	Variación (%)
1993	146.349	14.045	100	132.304	12,48
1994	215.021	20.295	2	194.728	47,18
1995	244.933	39.142	121	205.911	5,74
1996	342.210	54.312	63	287.961	39,85
1997	422.556	70.280	26	352.302	22,34
1998	276.811	70.400	356	206.767	-41,30
1999	565.647	60.331	3	505.319	144,4
2000e	580.000	74.714	22	505.308	-0.002

e: estimado. kg: kilogramos.

Fuente. Dirección de Economía Minera y Desarrollo

En el año 2000, el 11% de la producción total de boratos se destinó a la exportación y el 89% restante se dirigió al consumo local. Las importaciones son poco significativas comparadas con los volúmenes de producción y consumo. En 1998, la variación en el consumo arrojó resultados negativos, respecto al año anterior, de más del 40%, mientras que en 1999, el consumo aparente marca un importante crecimiento del 144% mantenido en el año 2000.

## 4.6. PRECIOS

### 4.6.1. PRECIOS INTERNOS

Los precios para el 2000, en el mercado interno son los siguientes (se deben tomar como precios indicativos):

Ácido bórico	U\$\$/t 480-
Ulexita 50	U\$\$/t 300-
Ulexita 30	U\$\$/t 240-

En el periodo 1991/1999 el comportamiento de los mismos ha sido estable, no experimentando importantes fluctuaciones. El rango de variación de precios para el mismo período fue:

Ácido bórico	U\$\$/t 480/420
Ulexita 50	U\$\$/t 370/300
Ulexita 30	U\$\$/t 260/230.

### 4.6.2. PRECIOS INTERNACIONALES

Los precios internacionales a julio de 2001 por toneladas fueron:

- **A granel, FOB California, USA.**

Bórax Decahidratado	U\$\$ 324 - 331
Bórax Pentahidratado, refinado	U\$\$ 388
Bórax Dehidratado	U\$\$ 862 - 864
Ácido Bórico	U\$\$ 812

- **Bolsas, UK (lotes 2 - 24 T)**

Bórax Decahidratado	U\$\$ 560 - 630
Bórax Pentahidratado, refinado	U\$\$ 490 - 560
Bórax Anhidro	U\$\$ 1.167 - 1.246
Ácido Bórico	U\$\$ 455

## 4.7. USOS Y ESPECIFICACIONES

Los principales rubros que utilizan boratos están constituidos por la industria del vidrio,

cerámicas y los agentes blanqueadores y limpiadores. En los últimos años, investigaciones y desarrollos han posibilitado la incorporación de boratos en nuevos mercados, como por ejemplo, los vidrios especiales para inmovilización de residuos radiactivos, aplicaciones en medicina y agricultura (micronutrientes)

En Estados Unidos el consumo de boratos se distribuye de la siguiente manera: productos de vidrio 73%, agricultura 3%, retardadores de fuego 4%, jabones y detergentes 6% y otros 14%. El consumo de ácido bórico fue el siguiente: productos de vidrio 43%, cerámica 4%, retardadores de fuego 5% y otros 48%.

En 1999/2000, el gobierno de los Estados Unidos firmó un acuerdo entre los productores de boratos y los principales productores de retardadores de fuego para desarrollar y expandir el uso de boratos en plásticos y aditivos de polímeros.

En cambio la Unión Europea distribuye su consumo de la siguiente manera: productos de vidrio 23%, cerámica 10%, blanqueador 35%, agricultura 2% y otros 30%.

### Estructura de demanda mundial de minerales de boro por uso final.

Destino	%
Fibra de vidrio	33%
Retardadores de fuego	3%
Fibra de vidrio grado textil	16%
Vidrio de borosilicato	11%
Jabones y detergentes	4%
Porcelanas y fritas	3%
Agricultura	5%
Metalúrgica	1%
Aplicaciones nucleares	3%
Diversos	10%
Desconocidos (venta por distribuidores)	12%

Fuente: Roskill, Boron 1996

Las especificaciones técnicas bajo las cuales son comercializados los boratos dependen del sector industrial.

### Especificaciones Técnicas para vidrio (normas ATBIAV)

Borato	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mín. (%)	SiO <sub>2</sub> máx. (%)	Na <sub>2</sub> O mín (%)
Bórax - 55	55	12	25
Colemanita	30	ne	ne
Ulex 30	30	ne	ne
(1 <sup>ra</sup> calidad)			
Ulex 40	39/40	ne	ne
(2 <sup>da</sup> Calidad)			
Rasorita* - 65	65	2	ne
Rasorita* - 46	47	1.5	21

ne: no especificado

\*: Kernita

Los boratos utilizados (consumidos) para la fabricación de vidrio en Brasil deben cumplir las normas ATBIAV - Associação Brasileira das Industrias Automaticas do Vidrio (Panorama Minero, 1991).

#### 4.8. MERCADOS Y TENDENCIAS

La demanda mundial de boratos espera un fuerte crecimiento, el cual estaría regulado por una evolución favorable de las industrias del vidrio y cerámica. Esta estimación está basada en el índice de la construcción y el desarrollo de la economía mundial (Lyday, 2000). En la Argentina, la industria del vidrio y sus derivados presento en la última década, un fuerte crecimiento de la producción, lo que condujo a una utilización plena de la capacidad productiva. La continuidad de esta tendencia se encuentra subordinada a un posible aumento de las exportaciones.

Las reservas mundiales de boratos son cuantiosas y las mayores concentraciones se encuentran en Turquía, Sudamérica y Estados Unidos. Se estima que la producción de Turquía y Estados Unidos continuará dominando el mercado mundial. Sin embargo, los boratos provenientes desde Sudamérica y Rusia incrementarán su participación en el mercado internacional. Esta tendencia es evidente a partir del crecimiento de las exportaciones de Argentina, Rusia y Chile.

La actividad del sector se encuentra concentrada en unas pocas firmas, tanto en Argen-

tina como en el mundo. Esta tendencia tiene su origen en la adopción de políticas de calidad total, lo cual incrementa las exigencias de las empresas hacia sus proveedores. Esto dificulta la incorporación de nuevas firmas y excluye a aquellas que no están en condiciones de adecuarse a las nuevas normas del mercado.

Nuevos mercados son difíciles de predecir, estadísticas recientes indican un consumo sólo por parte de los países industrializados (Lyday, 2000).

#### 4.9. BIBLIOGRAFIA

- SECRETARÍA DE MINERÍA DE LA NACIÓN, 2002. Estadística minera de la República Argentina.
- KISTLER R. B. AND HELVACI C., 1994. "Boron and Borates". En: Industrial Minerals and Rocks .6<sup>th</sup> Edition Donald D. Carr Senior Editor. AIME, 171-186.
- LYDAY, P., 2000. "Boron". Mineral Commodity Summaries 2000. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- INDEC. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Comercio Exterior.
- THE INDUSTRIAL MINERALS HANDYBOOK III, 1999. 35-39.
- DIRECCIÓN DE ECONOMÍA MINERA Y DESARROLLO.
- PANORAMA MINERO, 1999. "Geografía de los minerales Industriales de la República Argentina". 68-71