

# Boratos cálcico-sódicos de ambientes evaporíticos lacustres: aspectos sedimentológicos y diagenéticos generales

*Sodium-calcium borates of evaporitic lacustrine environments: general sedimentological and diagenetic aspects*

Federico Ortí

Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica; Universitat de Barcelona; Zona Universitària de Pedralbes; Barcelona 08028

## ABSTRACT

*Sodium-calcium borate deposits of Neogene age and evaporitic lacustrine origin are in many aspects (lithofacies, facies belts, depositional cycles, early and late diagenetic processes) similar to other chemical formations. The study of these particular precipitates, derived from thermal or volcanogenic fluids, accounts for a better understanding of most common types (sulphates, chlorides) of evaporites.*

**Key words:** Na-Ca borates, evaporites, lacustrine environments, sedimentology, diagenesis, Neogene

*Geogaceta, 20 (2) (1996), 270-273  
ISSN: 0213683X*

## Introducción

Los boratos constituyen un grupo mineral muy amplio (Sureda, 1991) que da lugar a depósitos de gran interés económico. Aunque existen varios tipos de yacimientos, los principales son los sedimentarios de origen evaporítico continental. Las cuencas lacustres con boratos, conocidas desde el Oligoceno hasta la actualidad, se emplazan en áreas ligadas a la acción de fluidos hidrotermales o volcanogénicos, a sustratos regionales enriquecidos en boro, a climas áridos o semiáridos, y con frecuencia, a bajas temperaturas ambientales.

En relación con las salmueras lacustres, los boratos pueden precipitar en un amplio rango de salinidades y asociadamente a diferentes tipos hidroquímicos, desde carbonatados a clorurados de alta concentración. Los principales boratos de las formaciones continentales son de Ca y Na, en menor grado de Mg, y en pequeñas cantidades de Sr y As. En la actualidad las principales regiones con sedimentación boratífera lacustre son:

- los "salares" de los altiplanos andinos (Argentina, Bolivia, Perú y Chile);
- las playas y lagos salinos del desierto de Mojave y de Death Valley (California);
- los lagos salinos del Plateau Qinghai-Xizang (Tibet); y
- la región del lago Inder (al N del Mar Caspio).

En estas zonas endorreicas la sedimentación de boratos se produce en diferentes ambientes:

- en las proximidades a las surgencias boratíferas, frecuentemente hidrotermales, en forma de conos o abanicos ("spring apron");

- en el subsuelo de algunas playas salinas; y
- en las orillas (más raramente en los fondos) de numerosos lagos efímeros, y de unos pocos lagos permanentes, mayores y más profundos.

En todos estos ambientes las soluciones boratíferas pueden presentarse solas, dando lugar a depósitos exclusivamente de boratos emplazados entre lutitas, cineritas y niveles volcanoclásticos, o bien mezcladas con soluciones evaporíticas diversas dando lugar a boratos en complejas paragénesis con carbonatos, sulfatos y cloruros.

## Condiciones de sedimentación, litofacies y transformaciones petrogenéticas

Las facies desarrolladas por los boratos son en todo comparables a las de otras evaporitas, en particular los sulfatos. Así, se distinguen *litofacies* laminadas, bandeadas, masivas, nodulares, bandeado-nodulares, meganodulares, columnares-verticales, macrocristalinas-intersticiales, enterolíticas, etc., así como brechoides, cavernosas, en venas fibrosas y en masas irregulares. Las texturas van desde micro a macrocristalinas (de menos de 1 mm a varios dm) y desde desorientadas a en agregados esferulíticos y fibroso-radiales. Muy pocos boratos, en particular el bórax, dan lugar a depósitos lacustres estratificados y potentes, con fábricas cristalinas propias de precipitación primaria subacuática. El resto de boratos suele presentar litofacies propias de crecimientos diagenéticos (nodulares, macrocristalinas intersticiales), así como mostrar diversos tipos de reemplazamientos petrológicos.

En los ambientes lacustres del Holoceno algunos boratos son muy frecuentes (bórax, tincal-

conita, ulexita), otros son más esporádicos (meyerhofferita, inyoita, hidroboracita, kurnakovita, nderita) y unos pocos están prácticamente ausentes (colemanita, priceíta, proberita, kernita) (Fig. 1). La comparación de estos hechos con la distribución de boratos en las formaciones del Neógeno, revela algunos aspectos de interés. Así, en los depósitos antiguos:

- la colemanita es el borato cálcico más importante;

- otros boratos, como la inyoita, proberita, priceíta (pandermita), etc., están mejor representados que en los medios actuales;

- la kernita está ligada al bórax en profundidad, existiendo un ciclo de transformaciones: bórax (primario)- kernita (de reemplazamiento en profundidad)- bórax (secundario, de exhumación);

- en superficie es corriente el reemplazamiento frecuentemente pseudomórfico- de varios boratos cálcicos y sódicos (colemanita, priceíta, bórax) por los carbonatos, en particular la calcita.

De acuerdo con lo anterior, los principales boratos de interés petrológico (formadores de roca) son la *colemanita*, *ulexita* y el *bórax*, y en menor medida la *kernita*. Varios de los anteriores procesos, en particular las reacciones diagenéticas de hidratación-deshidratación, aproximan este grupo particular a la problemática general de las evaporitas más comunes.

El estudio de los sistemas de equilibrio químico entre el borato, los diferentes cationes y el agua (Hanshaw, 1963; Christ *et al.*, 1967; Inan *et al.*, 1973), ha permitido establecer que:

- En relación con el principal grupo cálcico, integrado por la *inyoita*, *meyerhofferita*, y *colemanita*, se observa que las condiciones de preci-

BORATOS		NEOGENO-PLEISTOCENO	HOLOCENO
$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 13\text{H}_2\text{O}$	INYOITA		-----
$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	MEYERHOFFERITA		----- ?
$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	COLEMANITA	----- ?	
$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	PRICEITA		?
$\text{Na}_2\text{Ca B}_5\text{O}_9\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	ULEXITA		
$\text{Na Ca B}_5\text{O}_9\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	PROBERTITA		?
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	BÓRAX		
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	KERNITA		
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	TINCALCONITA	-----	
$\text{Ca Mg B}_6\text{O}_{11}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	HIDROBORACITA	----- ?	
$\text{Mg B}_6\text{O}_{19}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$	KURNAKOVITA		-----
$\text{Mg B}_6\text{O}_{10}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$	INDERITA		-----

Fig. 1.- Distribución comparativa de algunos de los boratos más frecuentes en los depósitos actuales y antiguos (basado, en parte, en Alonso, 1986, lámina 30).

Fig. 1.- Comparative distribution of some of the most common borates in recent and ancient deposits (partly based on Alonso, 1986, plate 30).

pitación directa de la fase anhidra (colemanita) son difíciles de alcanzar en los ambientes sedimentarios (Fig. 2A). Por ello, ha sido invocada en la literatura la precipitación de la colemanita exclusivamente a partir de reacciones de deshidratación de la inyoita o de la disolución incongruente de la ulexita (colemanita diagenética de enterramiento).

b) En la serie de boratos de Na/Ca, algo similar puede decirse de la *probertita* (considerada, en general, secundaria) respecto de la *ulexita* (Fig. 2B).

Ello no obstante, la absoluta dominancia en las formaciones neógenas de alguna de estas fases consideradas «secundarias», en particular la colemanita nodular, ha llevado a algunos autores a admitir su origen sinsedimentario (Kistler y Helvacı, 1994; Helvacı *et al.*, 1995). En el campo de los sulfatos, controversias similares se conocieron para la anhidrita nodular de sabkha (Shearman, 1966).

Algunos de los principales requerimientos físico-químicos para la precipitación primaria/sinsedimentaria de los boratos han sido resumidos por Sun Dapeng y Li Bingxiao (1990) en su estudio experimental a bajas temperaturas con

salmueras procedentes de numerosos lagos boratíferos actuales de China:

a) Equilibrio estable. Sólo el bórax precipita en laboratorio en condiciones metastables (rápidas). Los demás boratos requieren condiciones muy estables y largos periodos de tiempo para precipitar, haciéndolo siempre de un modo intersticial (en los sulfatos un comportamiento similar es ofrecido por algunos minerales típicamente diagenéticos, como la anhidrita, glauberita y polihalita, frente al yeso primario).

b) Bajas temperaturas. Muchos boratos tienen un comportamiento criófilo, precipitando preferentemente en invierno, y haciéndolo conjuntamente con minerales como la mirabilita.

c) Estadios de concentración. El bórax precipita preferentemente en aguas del tipo carbonatado y suele asociarse a varios carbonatos alcalinos, además de a la mirabilita. La ulexita se asocia a carbonato, mirabilita, yeso y halita. Muchos boratos, y en particular los de Mg, precipitan en aguas sulfatadas en un amplio rango de concentraciones.

d) Mezcla de salmueras. La precipitación de

boratos viene facilitada por la mezcla de salmueras, en particular de soluciones relativamente diluidas pero ricas en B (procedentes de fuentes termales) con las salmueras intersticiales lacustres, más concentradas pero de menor contenido en este elemento.

e) Suministro continuado de soluciones boratíferas. Un aporte continuado y de larga duración de estas soluciones a los medios lacustres y playas holocenas ha sido imprescindible para la sedimentación de cantidades apreciables de boratos.

#### Boratos de Ca/Na: tipos hidroquímicos, secuencias deposicionales y cinturones de facies

La distribución sedimentaria de los boratos de Ca y Na lacustres, tanto holocenos como actuales, muestra zonaciones basadas en la solubilidad mineral (menor en los cálcicos y mayor en los sódicos) y en la existencia de gradientes laterales de concentración. Igualmente, en los depósitos neógenos esta zonación se desarrolla en la vertical, dando lugar a una secuencia sedimentaria

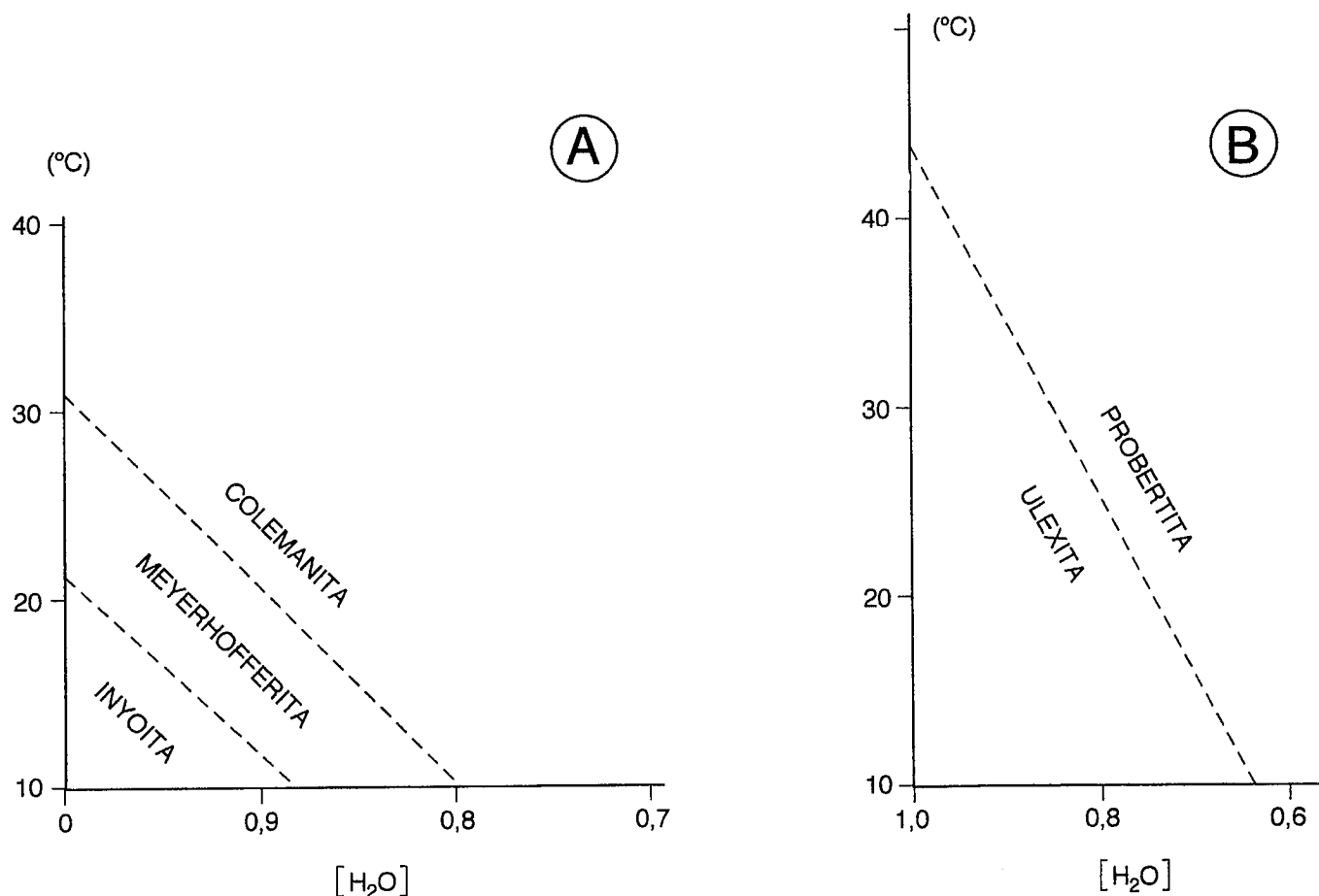


Fig. 2.- A) Estabilidad de boratos de Ca en función de la temperatura y la actividad del agua (simplificado de Barker y Barker, 1985, fig. 10); B) Estabilidad de boratos de Na-Ca en función de la temperatura y la actividad del agua (simplificado de Barker y Barker, 1985, fig. 11).

Fig. 2.- A) Stability field of Ca borates plotted on temperature and water activity (simplified from Barker and Barker, 1985, fig. 10); B) Stability field of Na-Ca borates plotted on temperature and water activity (simplified from Barker and Barker, 1985, fig. 11).

ria, ya sea única o cíclica, entre sólo boratos o entre lutitas-boratos o carbonatos-boratos.

Las importantes formaciones boratíferas neógenas de Argentina, Turquía y California nos permiten hacer una síntesis de los diversos tipos hidroquímicos, paragenéticos y secuenciales existentes en los boratos cálcico-sódicos de origen lacustre. Los principales minerales son: colemanita e inyoita (Ca), ulexita (Ca-Na) y bórax y kernita (Na). La mayor importancia económica reside en las grandes explotaciones de bórax de Boron (o Kramer; W de USA) y de Kirka (Anatolia), seguidas de las de colemanita de Anatolia (distritos de Bigadiç y Emet). El bórax (tincal) es también intensamente explotado en Tincalayu y Loma Blanca (Puna Argentina).

Desde el extremo cálcico al sódico, podemos establecer la ordenación hidroquímica, paragenética y secuencial que sigue (Fig. 3). Se refiere en primer lugar el tipo hidroquímico y a continuación la secuencia mineral vertical (de base a techo) y la formación tipo, con su referencia bibliográfica.

a) Tipo hidroquímico: Ca/borato (Fig. 3A)

*Colemanita*. Parte central del distrito Emet (Anatolia; Helvacı y Firman, 1976)

b) Tipo hidroquímico: Ca, Na / borato

*Inyoita-Ulexita* (Fig. 3B). Lagunita Playa (Puna Argentina; Helvacı y Alonso, 1994 (Fig. 3)

*Colemanita-Ulexita-Colemanita* (Fig. 3C). Distrito de Bigadiç (W Anatolia; Helvacı y Alaca, 1991)

*Colemanita-Ulexita-Probertita-Ulexita-Colemanita* (Fig. 3D). Furnace Creek Fm. (California; McAllister, 1970)

c) Tipo hidroquímico: Na, (Ca) / borato

*Colemanita-Ulexita-Borax-Ulexita-Colemanita* (Fig. 3E). Fm. Kirka (Anatolia central; Inan *et al.*, 1973, Fig. 11; Kistler y Helvacı, 1994)

(?)-*Ulexita-Borax (+Kernita)-Ulexita-Colemanita* Boron (California; Kistler y Helvacı, 1994, Fig. 4; Bowser y Dickson, 1966)

*Colemanita-Inyoita-Ulexita-Borax (ulexita-inyoita-ulexita-borax)-Ulexita-Inyoita* (Fig. 3F) Loma Blanca, Fm. Sijes (Puna Argentina; Alonso *et al.*, 1988; Fig. 3)

(?)-*Borax-Ulexita-Inyoita* Tincalayu (Puna Argentina; Alonso, 1986).

En el conjunto de estos boratos neógenos (sólo el de Lagunita Playa es actual) se aprecia la tendencia general a una secuencia del tipo :

borato Ca; borato Ca/Na; borato Na; borato Ca/Na; borato Ca. Esta puede ser completa y simétrica (Fm. Kirka) o asimétrica, faltando entonces algún término (yacimiento Boron) o algunos términos (yacimiento Tincalayu) basales. La secuencia también puede ser completa pero con repeticiones de algunos términos (Loma Blanca). En las secuencias en las que interviene el bórax, el depósito principal corresponde siempre a este mineral (+ la kernita), en posición central, siendo subordinados los otros boratos con Ca (colemanita, inyoita, ulexita).

Todas estas secuencias son claramente químico-evaporíticas y se organizan según las solubilidades de los boratos. Ello implica una evolución continua del quimismo del cuerpo boratífero, con una mitad inferior de concentración progresiva (hacia el borato de Na) y otra mitad superior de dilución (hacia el borato de Ca). En esta evolución se admite una tendencia hacia mayor alcalinidad desde la colemanita a la ulexita y al borax (Palmer y Helvacı, 1995). Por otro lado, la secuencia se organiza independientemente de que la solución boratífera sea aflorante (ello sólo ocurre con seguridad en el caso de algunos depósitos de bórax) o intersticial (en el resto de boratos, en

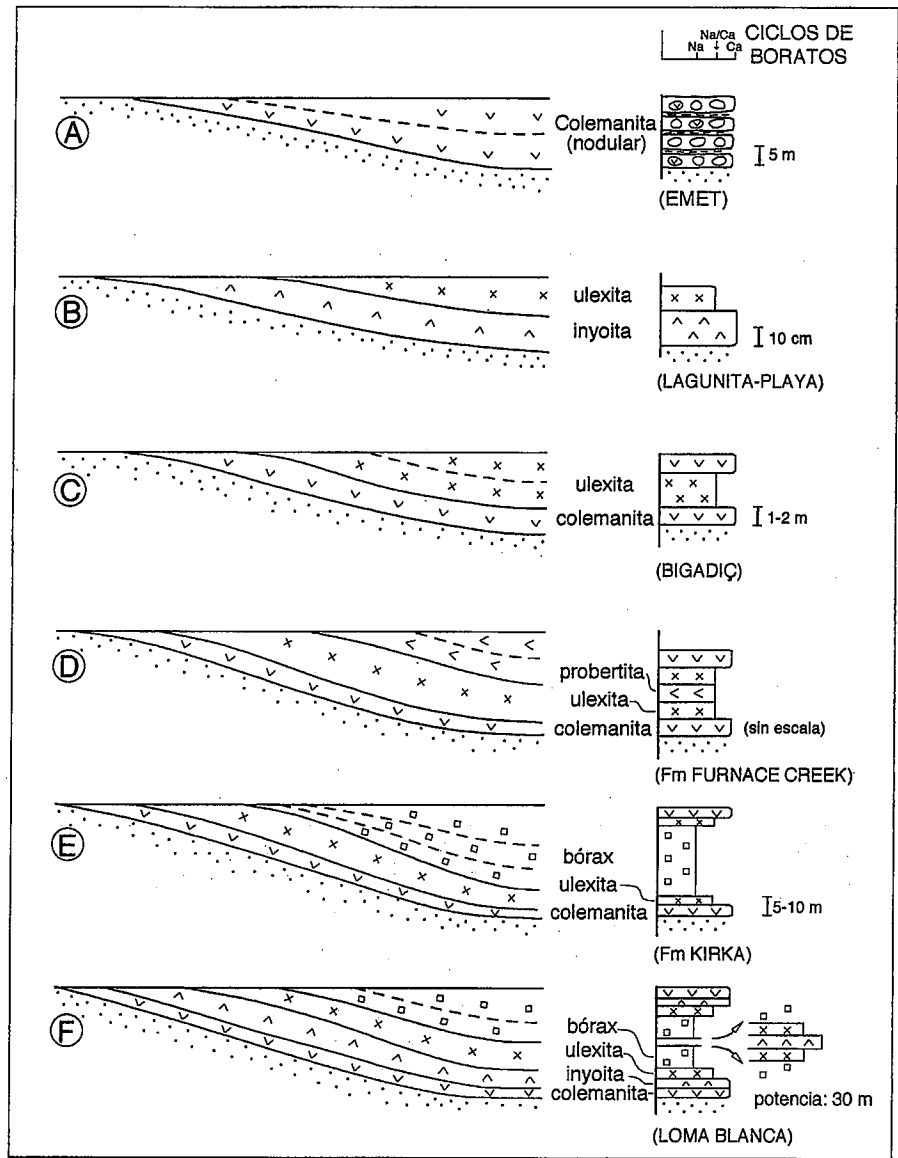
general). En este sentido, es ilustrativa la comparación con los yacimientos evaporíticos lacustres del Terciario peninsular ibérico, caracterizados por sulfatos zonados también del tipo cálcico-sódico (yeso, anhidrita, glauberita, thenardita y mirabilita), acompañados de magnesita, halita y polihalita (Ortí, 1982; Ortí y Salvany, 1991).

**Agradecimientos**

El presente trabajo se ha realizado en el marco del proyecto DGICYT PB94-0882. El autor expresa su agradecimiento a los Drs. R. Alonso (Univ. Salta, Argentina), C. Helvacı (Univ. Izmir, Turquía) y Sun Dapeng (Inst. Lagos Salados, Xining, China) por las visitas a yacimientos y ambientes boratíferos, las discusiones y la bibliografía suministrada.

**Referencias**

Alonso, R. (1986): *Tesis Doctoral*, Univ. Salta (Argentina), 196 p.  
 Alonso, R. (1991): *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos* (J.J. Pueyo, Coord.), Univ. Barcelona: 267-329.  
 Alonso, R., Helvacı, C., Sureda, R.J. y Viramonte, J.G. (1988): *Mineral. Deposita*, 23: 299-305.  
 Barker, Ch.E. y Barker, J.M. (1985): *Borates: Economic Geology and Production* (J.M. Barker y S.L. Lefond, Eds.), Soc. Min. Eng., Am. Inst. Min. Met. and Pet. Eng. Inc.: 101-135.  
 Bowser, C.J. y Dickson, F.W. (1966): *II Symposium on Salt* (J.L. Rau, Ed.), Northern Ohio Geol. Soc., vol 1: 122-132.  
 Christ, C.L., Truesdell, A.H. y Erd, R. (1967): *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31: 313-337.  
 Hanshaw, B.B. (1963): *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 475-B: B24-B27.  
 Helvacı, C. y Firman, R.J. (1976): *Trans. Inst. Min. Metal.*, B, 85: 142-152.  
 Helvacı, C. y Alaca, O. (1991): *Mineral Res. Explor. Bull.*, 113: 31-63.  
 Helvacı, C. y Alaca, R. (1994): *Proc. 29<sup>th</sup> Int'l Geol Cong*, Parte A: 299-308.  
 Helvacı, C., Ortí, F. y García-Veigas, J. (1995): *Int. Earth Sci. Coll. Aegean Region*, Abstracts: 24-25.  
 Inan, K., Dunham, A.C. y Esson, J. (1973): *Trans. Inst. Min. Metal.*, B, 82: 114-123.  
 Kistler, R.B. y Helvacı, C. (1994): *Industrial Minerals and Rocks*, 6<sup>th</sup> Edition (D.D. Carr,



**Fig. 3.-** Esquemas de secuencias deposicionales en boratos de Ca-Na lacustres, con las correspondientes interpretaciones de cinturones de facies. Los ciclos se indican sólo hasta el estadio de máxima concentración (véase explicaciones en el texto).

**Fig. 3.-** Scheme of depositional sequences in lacustrine Ca-Na borates, and interpretation of the respective facies belts. Cycles are indicated only till the maximum concentration stage (see text for explanations).

Ed.); Soc. Min. Met. and Exp. Inc.: 171-186.  
 McAllister, J.F. (1970): *California Division of Mines and Geology Map*, Sheet 14, 1: 24000.  
 Ortí, F. (1982): *Temas Geológico-Mineros*, IGME, 6 (2<sup>a</sup> p.): 485-506.  
 Ortí, F. y Salvany, J.M. (1991): *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos*. (J.J. Pueyo, Coord.), Univ. Barcelona: 193-230.

Palmer, M.R. y Helvacı, C. (1995): *Geochim. Cosmoch. Acta*, 59 (17): 3599-3605.  
 Shearman, D.J.J. (1966): *Trans. Inst. Metall.*, 75 B: 208-215.  
 Sun Dapeng y Li Bingxiao (1990): *7<sup>th</sup> Symposium on Salt*, Elsevier, vol 1: 177-193.  
 Sureda, R.J. (1991): *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos* (J.J. Pueyo, Cord.), Univ. Barcelona: 15-86