

3.- LOS MEDIOS EVAPORITICOS CONTINENTALES
Y SU EVOLUCION.

3.- LOS MEDIOS EVAPORITICOS CONTINENTALES

Y SU EVOLUCION.

Hemos hecho referencia en el capítulo anterior, a dos tipos fundamentales de formaciones evaporíticas: de origen marino, en las que las evaporitas han precipitado a partir de aguas oceánicas; y de origen continental, que proceden de la evaporación de aguas continentales.

En este capítulo nos ocuparemos únicamente de las evaporitas continentales, con el fin de introducir los conceptos más relevantes de este tipo de rocas que utilizaremos con frecuencia en los capítulos siguientes.

En la mayoría de los casos, las aguas continentales proceden inicialmente de la lluvia, y se han enriquecido en sales durante su circulación, superficial o subterránea, a través de las rocas (ígneas, metamórficas o sedimentarias) que rodean la cuenca evaporítica. En otras ocasiones, las aguas pueden tener un origen volcánico u otros tipos de emanaciones profundas, aunque estos casos tienen un carácter más particular. El quimismo de las aguas continentales estará, por tanto, muy directamente condicionado por las características litológicas del entorno de la cuenca, siendo éste un factor determinante en el tipo de minerales evaporíticos generados.

Desde la precipitación de las evaporitas en la cuenca sedimentaria, hasta la actualidad, pueden producirse diferentes transformaciones mineralógicas, texturales o estructurales, que pueden llegar a cambiar total o parcialmente sus características originales. En el tiempo, estos cambios ocurren en cuatro principales tipos de procesos:

- 1.- Procesos sedimentarios y diagenéticos tempranos.
- 2.- Procesos diagenéticos tardíos durante el enterramiento del depósito evaporítico.
- 3.- Procesos de deformación del depósito, por tectónica o halocinesis.
- 4.- Procesos diagenéticos tardíos durante la exhumación de la formación.

3.1.- PROCESOS SEDIMENTARIOS Y DIAGENETICOS TEMPRANOS.

3.1.1.- LOS LAGOS SALINOS CONTINENTALES. INTRODUCCION.

El tema de los medios evaporíticos actuales de tipo continental ha sido tratado por diversos autores que han estudiado diferentes ejemplos de lagos salinos en varios países del mundo (Australia, EE.UU., Chile-Argentina, Africa, etc.). De los trabajos publicados se pone claramente de manifiesto que estos lagos salinos tienen una gran variedad de características hidrológicas y sedimentarias.

Los trabajos generales de EUGSTER y HARDIE (1978) y HARDIE, SMOOT y EUGSTER (1978), ofrecen una amplia y completa visión sobre los lagos salinos continentales actuales, con descripción de sus características hidrológicas, hidroquímicas y sedimentológicas, por ello constituyen un buen punto de referencia para la interpretación de las formaciones fósiles. En este apartado haremos referencia en buena parte a estos trabajos, y a los conceptos que en ellos se definen.

* * * *

El límite de salinidad mínima para que un lago pueda ser considerado salino se estima en 5000 ppm. en sales disueltas, que es el límite máximo de tolerancia de la mayoría de los organismos de agua dulce. Para que pueda formarse un lago con estos valores de alta salinidad son imprescindibles dos condiciones principales: 1) que la tasa de evaporación sea superior a la de los aportes de agua en el medio lacustre; 2) que estas aguas se sitúen en una cuenca cerrada o en todo caso muy restringida.

Estas condiciones se dan en la actualidad en muy diversos puntos de la geografía mundial, desde zonas tropicales hasta zonas polares, desde zonas muy altas (altiplanos) hasta zonas muy deprimidas (por debajo del nivel del mar), y desde climas muy áridos hasta semiáridos.

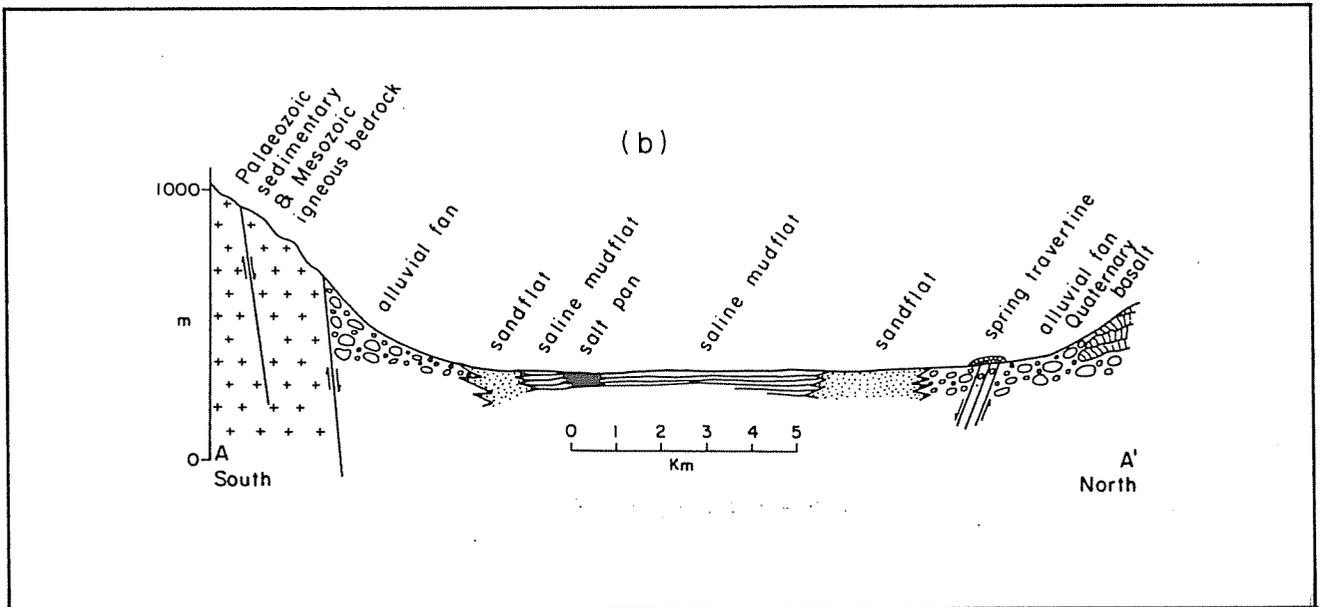
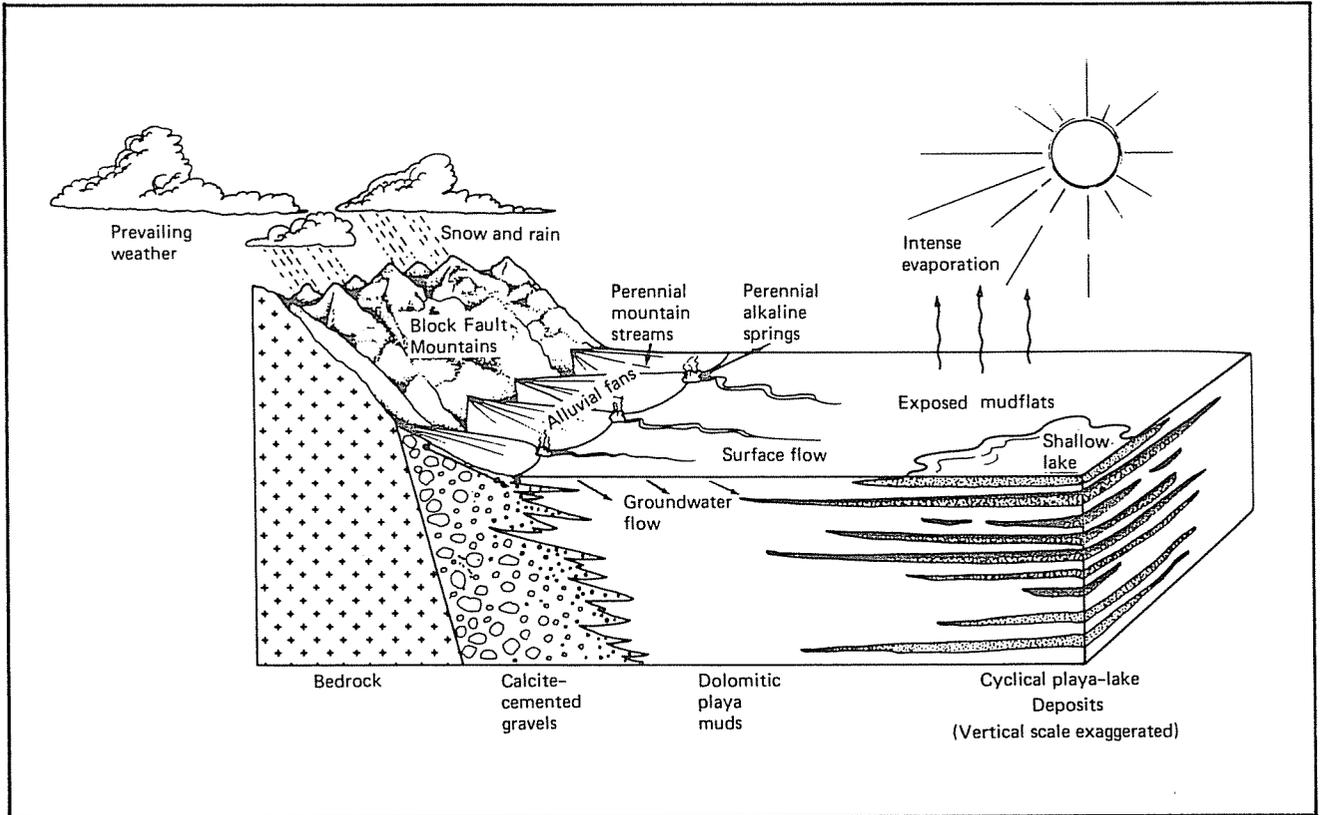


Figura 12.- Bloque diagrama esquemático mostrando la distribución de ambientes deposicionales en un sistema evaporítico del tipo playa-lake, desde el márgen de cuenca hacia su centro (EUGSTER y HARDIE, 1978).

Figura 13.- Corte esquemático con distribución de ambientes deposicionales en una cuenca continental (corresponde al Saline Valley, EE.UU.) con desarrollo de un playa-lake central y sistemas aluviales marginales (HARDIE, SMOOT y EUGSTER, 1978).

Según que la relación evaporación/aportes sea más alta o más baja, pueden darse dos tipos de lagos salinos: lagos salinos permanentes ("perennial saline lake") y lagos salinos efímeros ("ephemeral saline lake").

En el primer caso se hace necesario un aporte regular de agua al medio lacustre, que evite que éste llegue a la desecación. La profundidad de este tipo de lagos es muy variable, desde unos pocos metros, hasta varias decenas de metros. Ejemplos de lago salino permanente son el Great Salt Lake (EE.UU.) o el Mar Muerto (entre Israel y Jordania).

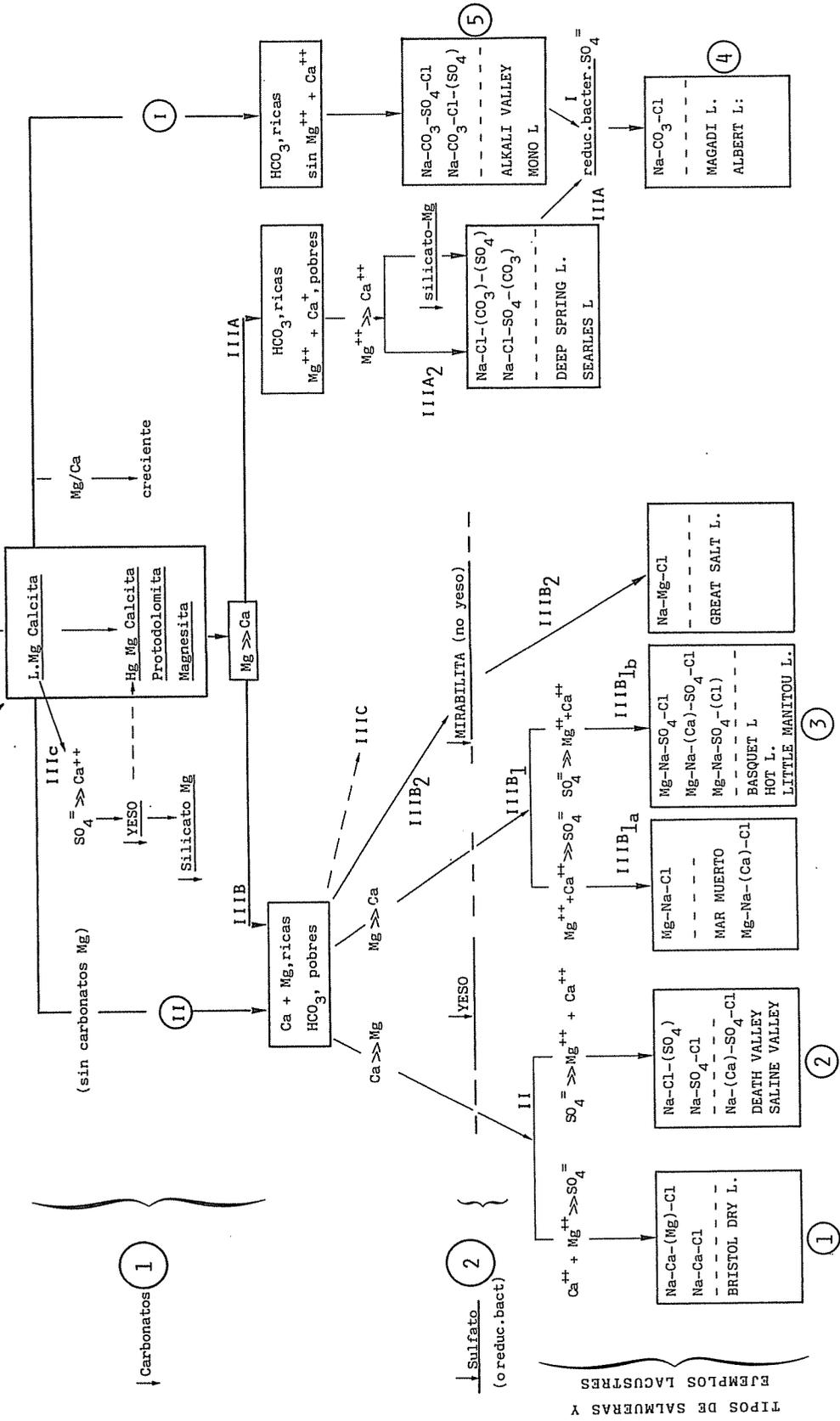
En los lagos salinos efímeros (figs. 12 y 13) la evaporación está siempre muy por encima de los aportes, lo que hace que la mayor parte del tiempo el lago esté totalmente desecado o reducido a una pequeña zona lacustre situada en el punto más deprimido de la cuenca evaporítica. La profundidad de estos lagos es siempre escasa, del orden de pocos decímetros hasta uno o dos metros como máximo. En los episodios de sequedad las aguas están muy concentradas y se extienden principalmente en el subsuelo, empapando el sedimento inconsolidado (detritico o carbonatado) que rodea el lago evaporítico. La concentración de estas salmueras subterráneas por efecto del bombeo evaporítico produce la precipitación de evaporitas intersticiales. Con frecuencia, el volumen de estas evaporitas intersticiales llega a ser muy superior al de las precipitadas a partir de las aguas libres en el cuerpo lacustre. Ejemplos de este tipo de lagos salinos efímeros son el Death Valley, Saline Valley (figs. 15 y 16) o el Deep Spring Valley, todos ellos en el Oeste de los EE.UU.

La mayoría de formaciones evaporíticas que se han descrito en las cuencas terciarias peninsulares, reflejan características de lagos salinos efímeros, especialmente por lo que se refiere a las formaciones que son motivo del presente estudio. Por ello, dejaremos al margen en esta ocasión, a los lagos salinos permanentes, para centrarnos en las características de los de tipo efímero.

Figura 14.- Esquema de evolución hidroquímica de las salmueras continentales y sus precipitados, en un medio evaporítico (extraído de ORTI, 1987 a partir de EUGSTER y HARDIE, 1978).

HIDROQUIMICA DE
SALMUERAS CONTINENTALES

INFLUJO DE AGUA SUBSATURADA
 $\text{Ca} + \text{Mg} \gg \text{HCO}_3$
 $\text{HCO}_3 \gg \text{Ca} + \text{Mg}$
 $\text{HCO}_3 \gg \text{Ca} + \text{Mg}$



↓ Carbonatos 1

↓ Sulfato (o reduc.bact) 2

EJEMPLOS DE SALMUERAS Y TIPOS DE SALMUERAS

3.1.2.- EVOLUCION DE LAS SALMUERAS.

Las aguas continentales que alimentan un medio evaporítico ("inflow") pueden llegar al mismo de cuatro maneras diferentes:

1) Por flujo subterráneo. Las aguas de circulación subterránea son habitualmente las que con mayor eficacia alimentan los lagos salinos efímeros, no sólo en volumen de fase líquida, sino también en sales, pues su lenta circulación a través de las rocas y sedimentos que rodean el medio evaporítico permite un mayor enriquecimiento en sales minerales por disolución que los otros tipos de aportes.

Estas aguas pueden corresponder a la descarga de los acuíferos de las cordilleras que bordean la cuenca evaporítica, o bien proceder de la infiltración a través de los abanicos aluviales de las aguas de escorrentía superficial sobre estas mismas cordilleras. El flujo subterráneo es también la forma en que más regularmente son alimentados estos lagos salinos, permitiendo un nivel freático más o menos constante que mantiene el nivel del lago salino en los puntos más deprimidos de la cuenca en los periodos de sequía.

2) Por escorrentía superficial. Después de las lluvias caídas sobre los relieves que rodean la cuenca evaporítica, las aguas descienden por los valles y desembocan en la cuenca a través de los abanicos aluviales, en forma de corrientes no canalizadas ("sheetflood streams") cargadas de sedimento detrítico y sales en disolución. Al llegar al medio evaporítico, estas corrientes pierden bruscamente energía, depositan en los márgenes del lago salino el sedimento que llevan en suspensión y mezclan sus aguas con las salmueras, diluyéndolas y expandiendo el área del lago. Este tipo de aportes es intermitente, y pueden darse largos periodos (meses, años) entre uno de ellos y el siguiente, por lo que normalmente no es el motivo principal de recarga del medio evaporítico.

También pueden tener relevancia los aportes de aguas confinados (en canales) con flujos más regulares, aunque este tipo de aportes es más propio de los lagos salinos permanentes, y poco corriente en los de carácter efímero que estamos tratando.

TABLA núm 4		Principales carbonatos, sulfatos y cloruros en los lagos salinos continentales
CARBONATOS		
* Calcita		CaCO_3
* Dolomita		$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
* Magnesita		MgCO_3
Nahcolita		NaHCO_3
Nastrón		$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Thermonatrita		$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Trona		$\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Burkeita		$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$
SULFATOS		
* Yeso		$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
* Anhidrita		CaSO_4
* Celestina		SrSO_4
Thenardita		Na_2SO_4
Mirabilita		$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
* Glauberita		$\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$
Bloedita		$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Epsomita		$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
* Hexahidrita		$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Kieserita		$\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
CLORUROS		
* Halita		NaCl
Sylvita		KCl
Antarcticita		$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Bischofita		$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Carnalita		$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Tachihidrita		$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
* mineral presente en las formaciones evaporíticas cont. de Navarra y La Rioja.		

La tabla número 4 presenta una lista de los principales minerales que integran los medios evaporíticos continentales actuales y que pueden también hallarse en las formaciones antiguas.

3) Por lluvias caídas directamente sobre el medio evaporítico. Con menor frecuencia que los casos anteriores, los lagos pueden recargarse también mediante lluvias caídas directamente sobre la cuenca evaporítica. Este fenómeno aporta pocas sales al medio evaporítico y ningún tipo de sedimento detrítico.

4) Por manantiales próximos al medio evaporítico. En algunos casos se han observado pequeños manantiales, situados al pie de los abanicos aluviales o bien en relación con fracturas o puntos de debilidad en la cuenca, que de forma más o menos permanente alimentan el lago salino. Estos manantiales pueden formar pequeños lagos carbonatados (travertinos) periféricos al sistema evaporítico, debido a la baja concentración de sus aguas, que permite un buen desarrollo de organismos fijadores del carbonato.

* * * *

Desde que el agua llega al medio evaporítico hasta que ésta es total o parcialmente evaporada se produce una evolución química de las salmueras, que consiste en una progresiva concentración de las mismas y también progresivo cambio de su quimismo. Este cambio es debido a la precipitación fraccionada de las sales, que cristalizan de menos solubles a más solubles al irse sobrepasando los productos de solubilidad de cada mineral (fig. 14).

Las aguas que llegan al medio evaporítico pueden tener, como ya se ha expuesto, una variada composición química, pero por lo general siempre están presentes como componentes principales los siguientes iones: Ca, Mg, Na, K, HCO₃, CO₃, SO₄ y Cl, además de SiO₂ y otros elementos minoritarios como el Br, PO₄, B, Sr, etc.

El tipo de aguas más corrientes que alimentan los medios evaporíticos presentan la siguiente composición química:

Na - CO₃ - Cl - SO₄
Na - Cl - SO₄
Na - Mg - Cl - SO₄
Ca - Mg - Na - Cl

Las primeras sales en precipitar son los carbonatos, primero en forma de calcita con bajo contenido en magnesio (LMC), después como calcita con alto contenido en magnesio (HMC) y más adelante como protodolomita. Los procesos de dolomitización o formación de magnesita se producen en estadios más avanzados de concentración de las salmueras, como procesos diagenéticos tempranos. La influencia de microorganismos en la precipitación de estos carbonatos no está siempre clara, pues en buena parte el carbonato puede tener un origen inorgánico.

La relación del HCO_3 , Ca y Mg en las aguas iniciales y la precipitación de carbonatos en las primeras fases de concentración de las salmueras, es importante en la evolución posterior de las salmueras resultantes:

Si la relación $\text{HCO}_3/\text{Ca}+\text{Mg} \gg 1$, una vez precipitados los carbonatos se habrá agotado el Ca y Mg en las salmueras y no quedará Ca suficiente para formar yeso en una fase más avanzada de concentración. El HCO_3 restante y los sulfatos reaccionarán con el Na para generar sales sódicas tales como la trona o la mirabilita.

Si la relación $\text{HCO}_3/\text{Ca}+\text{Mg} \ll 1$ entonces, precipitará poco carbonato y las aguas, una vez agotadas en HCO_3 , estarán aún enriquecidas en Ca y Mg, que favorecerán la precipitación posterior de yeso y más adelante de sales ricas en Mg.

Cuando la relación $\text{HCO}_3/\text{Ca}+\text{Mg}$ es próxima a la unidad, la producción de carbonato será máxima, y las salmueras resultantes quedarán agotadas en los tres elementos. Los sulfatos siguientes también serán de tipo sódico (mirabilita).

En las etapas de dilución y expansión lacustre las sales precipitan principalmente a partir de las aguas libres ("open lake brines"), pero a medida que éstas se van concentrando y el lago disminuye su superficie, empieza a tener progresiva importancia la precipitación de sales de forma intersticial. Este proceso llega a ser máximo en los estadios de precipitación de la halita o posterior, donde la mayor parte de los procesos evaporíticos pueden tener lugar en subsuelo a partir de las salmueras intersticiales ("occluded brines").

Cuando las salmueras llegan al grado de saturación del sulfato precipitará el yeso (o mirabilita en caso de que se haya agotado el Ca en la salmuera). Esta precipitación puede tener lugar bajo lámina de agua, depositándose el yeso en el fondo del lago formado un sedimento laminado, o bien de forma intersticial entre el sedimento lutítico o carbonatado blando, como cristales desplazantes, o bien como cristales poiquilíticos (cemento). En el fondo del lago, el yeso forma un sedimento inconsolidado de textura más o menos fina, que puede ser retrabajado por el oleaje-viento, o bien moldeado por los tapices algales o estructuras de desecación, dándole estructuras que pueden ser reconocidas en el registro fósil.

La relación Ca/SO_4 es importante es esta etapa de evolución de las salmueras, pues el agotamiento de estos dos elementos producirá salmueras ricas en Cl, Na, Mg.

HARDIE et.al. (1978) consideran a los carbonatos y yeso como precipitados de una fase temprana de evolución de las salmueras, en la que sólo se forman minerales primarios. Las salmueras más evolucionadas tienen la propiedad de formar nuevas sales por precipitación directa (minerales primarios) o bien por reacción con las sales formadas anteriormente (minerales secundarios).

En las etapa más avanzadas se formarán sulfatos ricos en Na, Mg y K, como la glauberita, mirabilita, bloedita, epsomita, etc., en su mayor parte como productos intersticialmente entre el sedimento blando que rodea al lago salino, y precipitará también la halita a partir de las aguas libres ("salt pan").

Un aspecto interesante que se ha observado en los lagos salinos actuales, es la formación de extensas costras salinas que recubren la superficie de la llanura lutítica que rodea el lago salino. Estas costras se han originado como eflorescencias salinas, por bombeo evaporítico de las salmueras subterráneas y su total evaporación en la superficie. El espesor de estas costras llega a alcanzar los 50 cms. y ocasionalmente hasta 1 m., y están constituídas por diferentes sales muy solubles, principalmente cloruros, entre los que destaca la halita como mineral dominante (los sulfatos han precipitado en la zona vadosa durante el ascenso de las salmueras desde el nivel freático hasta la superficie).

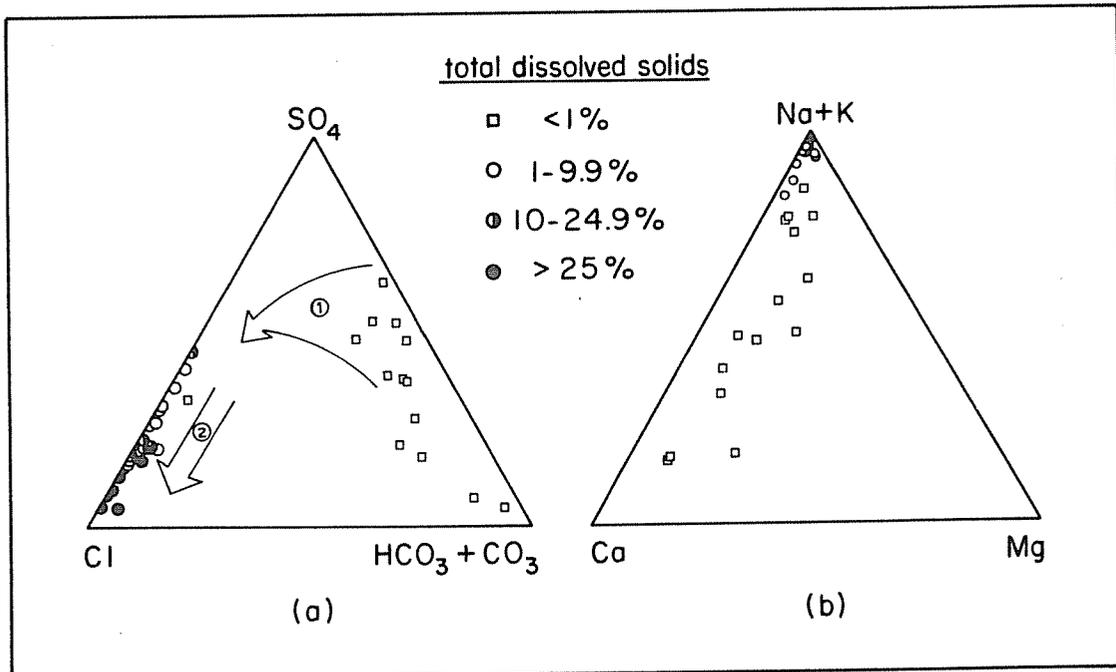
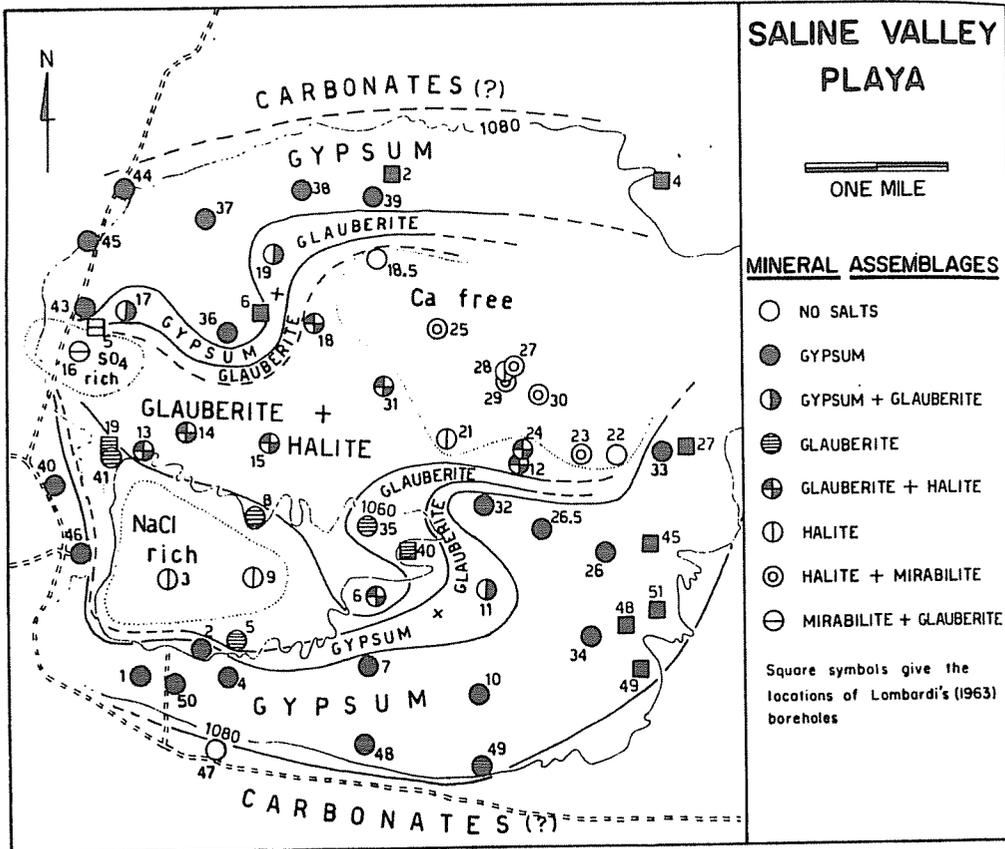


Figura 15.- Mapa del Saline Valley, mostrando la distribución de minerales evaporíticos formados intersticialmente entre los 15 pies por debajo de la superficie de la playa y la costra superficial de eflorescencias salinas. Se observa la distribución concéntrica de facies minerales de salinidad creciente desde los márgenes hacia el centro del lago (HARDIE, 1968).

Figura 16.- Diagramas triangulares mostrando la evolución hidroquímica de las salmueras del Saline Valley, desde los estadios de mayor dilución ($< 1\%$) hasta los de mayor concentración ($> 25\%$) (HARDIE, 1968).

Estas costras no llegan a preservarse en el registro sedimentario del medio evaporítico, pues son periódicamente disueltas por las aguas de escorrentía superficial y recicladas en el lago salino ("salt pan") en forma principalmente de halita. La disolución de las costras enriquece considerablemente las aguas de escorrentía en Cl y Na, así como en Br, B o F en menor importancia.

La halita del lago salino llega a formar un depósito importante de sal bien estratificada. Cada capa de sal puede tener varios centímetros de espesor y está constituida por dos términos sedimentarios: uno inferior (de pocos milímetros de espesor), de arcillas con materia orgánica (color oscuro), formado en los estadios de dilución del lago salino, que favorecen el desarrollo de microorganismos; y otro superior (de varios milímetros o centímetros), de halita pura, correspondiente a los estadios de precipitación de la halita cuando las salmueras han rebasado los límites de precipitación de la misma. Cada capa doble de halita corresponde a un episodio de inundación del medio evaporítico.

Las salmueras residuales después de la precipitación de la halita, están muy enriquecidas en Mg, K y otros elementos que no han formado parte de las sales hasta este momento precipitadas. Estas salmueras empapan el sedimento que bordea el lago salino y tienen un gran poder de reacción con los minerales evaporíticos de más baja concentración, generando nuevos minerales evaporíticos ricos en Mg y K, como la polihalita, bischofita, bloedita, magnesita, etc.

3.1.3.- SUBAMBIENTES EN UN SISTEMA EVAPORITICO CONTINENTAL.

El término "playa-lake" ha sido utilizado por diversos autores para referirse de forma general a un medio evaporítico continental del tipo lago salino efímero. Este tipo de lagos se presentan en cuencas endorreicas, ocupando su zona más deprimida, y están bordeados por sistemas aluviales y/o fluviales que aportan el sedimento detrítico que rellena la cuenca y entre el que se encajan las evaporitas.

La relación entre sistemas aluviales y playa-lake permite establecer diferentes subambientes sedimentarios, que se distribuyen de forma más o menos concéntrica desde los márgenes de la cuenca hasta el centro de la misma, pasando en este mismo sentido y de forma gradual, desde facies detríticas gruesas hasta facies evaporíticas progresivamente de mayor salinidad.

Desde los trabajos de HARDIE et.al. (1978), se aceptan los siguientes subambientes desde borde de cuenca hacia su centro:

A) Abanicos aluviales ("aluvial-fan") y llanura arenosa ("sandflat") : Al pie de las cordilleras en erosión se depositan los materiales detríticos más gruesos (gravas, bloques y arenas). Este sedimento se dispone en forma de abanicos, con pendiente suave (máximo 4-5°) y con tamaño de grano decreciente hacia centro de cuenca. Las características de estos ambientes detríticos de borde de cuenca han sido descritas por diversos autores por lo que no entraremos en esta ocasión en detalle sobre los mismos.

B) llanura lutítica ("mudflat" o "dry mudflat"): El material detrítico más fino (arcillas, limolitas y arenas finas) sedimenta en la zona central de la cuenca formando una extensa llanura cuya pendiente es prácticamente nula. El sedimento se deposita a partir de corrientes superficiales de agua no canalizadas, o bien formando canales efímeros, de escaso desarrollo.

En las avenidas de mayor energía pueden llegar a la llanura lutítica arenas finas o limolitas que sedimentan formando niveles tabulares de poco espesor o bien capas con morfología acanalada. Estas capas están formadas por un único episodio sedimentario, y presentan corrientemente estructuras del tipo: granoclasificación positiva, climbing ripples, cantos blandos, mudcracks, etc. Es corriente también, que estas arenas lleguen a extenderse sobre un medio lacustre (carbonatado o evaporítico) y formen capas con estructura de turbidita (facies fluvio-lacustres).

C) llanura lutítica salina ("saline mudflat" o playa): Comprende la zona externa del playa-lake, normalmente

desechada, donde las aguas ocupan una posición subterránea. Las evaporitas se forman intersticialmente al ser concentradas por bombeo evaporítico las aguas subterráneas. En las etapas de expansión lacustre esta zona puede quedar parcial o totalmente cubierta por las aguas libres y precipitar sales de baja concentración (carbonatos, yeso), hasta que la evaporación vuelve de nuevo a restringir el lago a la zona central del playa-lake. Las facies evaporíticas precipitadas intersticialmente destruyen la estructura original del sedimento encajante, que queda relegado a carácter de matriz entre las evaporitas.

En ocasiones se ha utilizado el término "sabkha" para designar en sentido amplio a las llanuras lutíticas con desarrollo de evaporitas intersticiales. Este término se ha utilizado preferentemente para referirse a evaporitas marinas (llanuras lutíticas salinas supramareales), y en nuestro caso hemos preferido no utilizarlo para estos ambientes continentales, a pesar de que en líneas generales los procesos sedimentarios y diagenéticos son muy similares en ambos tipos de medios evaporíticos.

Entre la zona más externa de la llanura lutítica salina y el lago salino se presenta una gradación completa de facies evaporíticas, como consecuencia de un gradiente salino creciente en este mismo sentido. Por lo general pueden definirse cinturones de facies, que para el quimismo y características de cada lago salino tendrán una asociación mineral diferente. Algunos de los ejemplos mejor conocidos de esta distribución concéntrica de facies en lagos salinos efímeros son los del Saline Valley (fig. 15) (HARDIE, 1968), donde se distinguen bien cuatro cinturones de facies, que de margen a centro del mismo están constituidas por 1) carbonatos, 2) yeso, 3) glauberita y 4) halita-mirabilita; y el Deep Springs (JONES, 1965), con cinco cinturones de facies, que de margen a centro son: 1) calcita-aragonito, 2) dolomita, 3) gaylussita, 4) thenardita y 5) burkeita.

D) lago salino efímero ("salt pan"): Ocupando la zona más deprimida del playa-lake, se presenta un lago que puede estar desecado en los períodos de mayor sequía, o bien presentar una lámina de agua poco profunda mantenida por el flujo subterráneo de salmueras. En este lago precipita principalmente halita aunque también pueden precipitar sales de menor concentración en las etapas de dilución del mismo.

El área ocupada por este lago salino es muy reducida en comparación con el área ocupada por la llanura lutítica salina periférica, pudiendo ser ésta última del orden de 10 ó 50 veces mayor.

3.1.4.- MINERALES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS.

Hemos utilizado ya en algunas ocasiones, y seguiremos utilizando con frecuencia, los términos de mineral primario y mineral secundario; por ello creemos necesario exponer el sentido de estos términos tal como los usamos en el presente trabajo:

Nos referiremos como minerales primarios a aquellos minerales que han precipitado directamente de una salmuera al llegar ésta al límite de saturación de los mismos. Los minerales primarios pueden crecer en la interfase agua-aire de un lago y posteriormente caer al fondo y sedimentarse en él; pueden crecer en la interfase agua-sedimento, también en un lago; o bien pueden crecer intersticialmente entre un sedimento blando (normalmente lutítico, carbonatado o yesífero). En este último caso, los cristales pueden crecer desplazando el sedimento, y por tanto deformando su estructura original, o bien de forma poiquilítica, sin destruir la estructura del mismo, a modo de cemento.

Como minerales secundarios nos referimos a aquellos minerales que se han formado a partir de la transformación de un mineral antecesor, que puede ser primario o también secundario. Esta transformación se debe al estado inestable del mineral ante un cambio de sus condiciones químicas (salmueras de más alta o baja concentración) o físicas (presión, temperatura...). El nuevo mineral formado se mantendrá en equilibrio hasta que nuevamente se rebasen sus límites de estabilidad.

Los minerales secundarios pueden formarse en las diferentes fases diagenéticas de una formación evaporítica: en el medio sedimentario (diagénesis temprana), durante el enterramiento, o bien durante la exhumación (diagénesis tardía). Por el contrario, los minerales primarios se generan en el medio sedimentario y en la mayoría de los casos no llegan a preservarse en las formaciones antiguas

hasta la actualidad (excluimos en estas consideraciones a los crecimientos de yesos fibrosos y eflorescencias de diferentes mineralogías, que de forma relativamente reciente se han desarrollado sobre las formaciones evaporíticas en los afloramientos)

Las diferentes transformaciones minerales que afectan una formación evaporítica producen cambios texturales que dificultan el reconocimiento de la mineralogía antecesora. No obstante, son frecuentes las estructuras relictas de la antigua composición mineral, bien como inclusiones en el nuevo mineral o bien como pseudomorfos.

Con el término pseudomorfo, no referimos en este trabajo, a todas aquellas morfologías que se llegan a reconocer en un mineral secundario de su mineral antecesor. Por lo general estas formas suelen preservarse gracias a la matriz o impurezas intercristalinas que contenía la antigua mineralogía y que en la transformación mineral ha sido preservada. Estos pseudomorfos normalmente sólo son observables al microscopio, y son de gran utilidad en sedimentología de rocas evaporíticas, pues permiten reconocer las características primarias del sedimento.

El ejemplo que más ampliamente ilustra las transformaciones minerales en las formaciones evaporíticas es la del ciclo del sulfato cálcico (fig. 17).

1) En la cuenca sedimentaria el sulfato cálcico precipita como yeso primario. Parte del mismo puede ser anhidritizado de forma temprana por reacción con salmueras concentradas, para dar facies nodulares de anhidrita. Entre los tipos de yeso primario más característicos de las formaciones continentales, están el yeso microlenticular (tamaño milimétrico o inframilimétrico), yeso lenticular (tamaño centimétrico), y yeso selenítico (grandes cristales de varios centímetros o decímetros de tamaño, translúcidos y con caras cristalinas ligeramente curvadas). En este trabajo utilizaremos también los términos gipsilutita y gipsarenita para referirnos a rocas de yeso primario microlenticular, de tamaño limo o arena.

Algunos autores (MANDADO, 1987 y otros) utilizan el término selenítico para referirse a los grandes cristales de yeso, primarios o secundario (yeso megacrystalino)

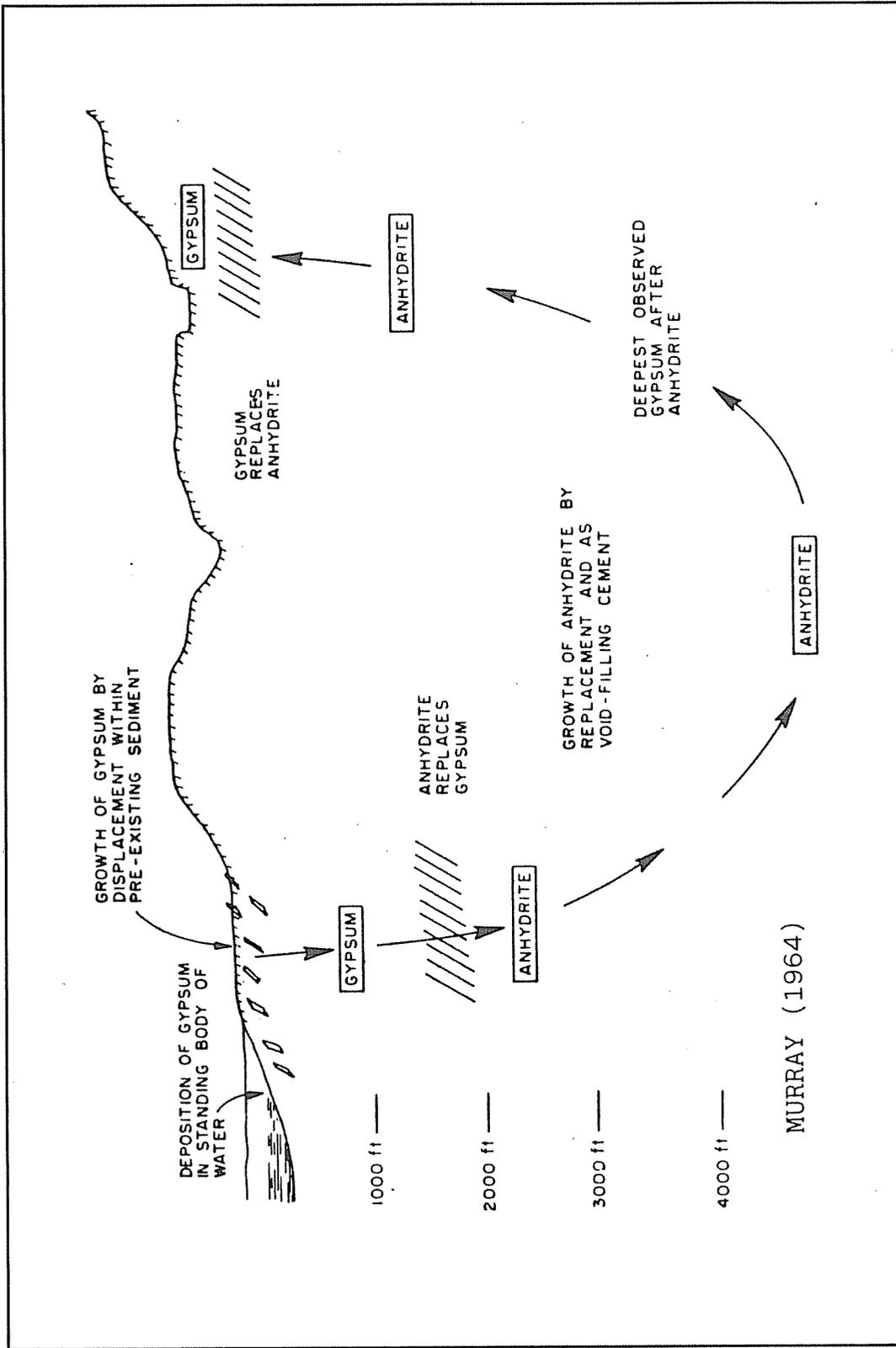


Figura 17.- Esquema que ilustra el ciclo diagenético del sulfato cálcico (yeso primario-anhidrita-yeso secundario) (MURRAY, 1964).

indistintamente, que con frecuencia se reconocen en las formaciones continentales peninsulares. El término yeso espejuelo ha sido utilizado también para referirse a los grandes cristales de yeso, al margen de su origen primario o secundario.

2) Durante el enterramiento, todo el yeso (no anhidritizado tempranamente) es transformado a anhidrita por efecto de la presión ejercida por la masa de sedimentos suprayacentes sobre el depósito sulfatado, o bien por efectos de compresión tectónica.

Si la cobertera suprayacente no llega a ser excesiva, el yeso puede preservarse hasta la actualidad con sus características primarias. No obstante, son pocas las formaciones antiguas de sulfato cálcico que hayan resistido la anhidritización. Para el caso de la Península Ibérica, del conjunto global de formaciones originalmente de yeso primario, sólo algunas correspondientes al Mioceno o de edad posterior preservan sus características primarias, y todas las demás han pasado por anhidrita (ORTI et.al., 1986).

El tema de la anhidrita, su origen y variedades minerales ha sido tratado por diversos autores. En ORTI y ROSELL (1982) se hace una discusión sobre los diferentes tipos de anhidrita presentes en las formaciones fósiles y se propone una nomenclatura petrográfica válida para todas ellas, que hemos utilizado en el presente trabajo.

3) Durante la exhumación, y como consecuencia de la descompresión y contacto con las aguas meteóricas, la anhidrita se transforma nuevamente en yeso (yeso secundario), que es la forma en que siempre se presentan las formaciones anhidríticas en superficie y subsuperficie. El yeso secundario, independientemente del origen o características de la formación anhidrítica que reemplazan, se presenta siempre con las mismas variedades petrográficas: yeso alabastrino, porfiroblástico o megacrystalino (algunos autores utilizan otra nomenclatura, pero de hecho hacen referencia a estas mismas facies).

Los trabajos que describen las texturas de yeso secundario, sus variedades y origen, son diversos. Entre éstos pueden citarse los de HOLLIDAY (1970), MOSSOP y SHEARMAN (1973), SAN MIGUEL y ORTI (1973), y ORTI (1977).

Antes de finalizar este apartado, quisiéramos exponer también algunos aspectos sobre la formación temprana de los nódulos de anhidrita:

Este elemento litológico, que caracteriza en mayor o menor grado a todas las formaciones evaporíticas continentales peninsulares, tiene un origen genético bien establecido: se trata de nódulos de crecimiento intersticial, que se han generado principalmente en los márgenes del sistema evaporítico (llanura lutítica y llanura lutítica salina). Sin embargo, no está del todo claro su origen primario o secundario.

Las observaciones petrográficas de estas facies (en la actualidad como anhidrita o yeso secundario), no permite reconocer pseudomorfos u otras estructuras que pongan de manifiesto un origen secundario de la anhidrita. El estudio de "sabkhas" costeras actuales, tales como la costa meridional del Golfo Pérsico (SHEARMAN, 1963, 1966; EVANS et.al. 1969). ponen claramente de manifiesto que la anhidrita nodular, con similares características que las observadas en las formaciones fósiles, tiene un origen diagenético temprano y procede del reemplazamiento de un yeso primario antecesor.

Ante estos datos, y sin otros criterios que permitan mejorar esta interpretación, consideraremos a la anhidrita nodular como un componente litológico secundario, formado tempranamente en el medio sedimentario, de forma intersticial y a partir de un yeso antecesor.

3.2.- PROCESOS DIAGENETICOS TARDIOS: ENTERRAMIENTO.

Con la progresiva acumulación de sedimentos, las evaporitas van siendo enterradas en la cuenca sedimentaria. En los primeros estadios de este enterramiento se producen procesos de compactación y eliminación de salmueras intersticiales, que concluirán con la litificación del sedimento.

Dentro de esta fase temprana de enterramiento creemos que se generan los meganódulos de anhidrita, que caracterizan a las formaciones Monteagudo y Ribaflecha, así

como otras del Terciario continental peninsular. Estos meganódulos crecen entre los yesos o anhidritas diagenéticas tempranas cortando sus estructuras, sin apenas producir deformaciones en los sulfatos encajantes. Es por ello que creemos que debieron formarse en estadios de una cierta litificación del sedimento, pero aún con circulación de salmueras (salmueras residuales o acuíferos profundos) que pudieran alimentar su crecimiento.

En una fase más avanzada de enterramiento, el yeso es transformado en anhidrita. Esta anhidritización, a diferencia de la que se formó en el medio sedimentario como diagénesis temprana, no produce ningún tipo de distorsión sobre el sedimento sulfatado, preservando perfectamente sus estructuras primarias. En la diagénesis temprana, como se ha visto, el crecimiento de nódulos de anhidrita comporta importantes deformaciones de la estructura de los materiales encajantes, al tener ésta aún una constitución blanda.

El sulfato cálcico se preserva como anhidrita hasta que la erosión vuelve a ponerlo en contacto con el exterior. Los minerales evaporíticos anhidros, al margen de los procesos de compactación, recristalización o deformación tectónica, no sufren transformaciones minerales, y las características que presentan en la actualidad no difieren mucho de las que les constituyeron en el medio sedimentario.

3.3.- TECTONICA Y DIAPIRISMO.

Con frecuencia las evaporitas se muestran en los afloramientos intensamente deformadas y con estructura caótica, lo que complica enormemente su estudio estratigráfico y litológico (fotos 7, 8 y 24). Estas deformaciones son debidas al comportamiento plástico de los sulfatos y cloruros que forman la mayor parte de las formaciones evaporíticas bajo los fenómenos de tipo geodinámico. Estos fenómenos pueden ser básicamente de tres tipos:

a.- Fenómenos de tipo tectónico. Con frecuencia las evaporitas constituyen los niveles de despegue de las estructuras tectónicas, formando colchones sobre los que se

desplazan los mantos de corrimiento, o bien son los niveles de amortiguación de fallas y pliegues. Entre los ejemplos más próximos a nuestra área de estudio, que ilustran mejor estos casos, puede citarse el continuo afloramiento de evaporitas triásicas (Keuper) que limitan el sector riojano de la cuenca del Ebro con las sierras de Cameros y La Demanda. El cabalgamiento de estas sierras sobre el Terciario del Ebro se ha producido a través de las evaporitas del Keuper, que muestran una estructura intensamente deformada y caótica.

b.- Fenómenos de tipo diapírico. Los diapiros se forman por efecto de carga litostática sobre una formación evaporítica. En estas condiciones, los materiales evaporíticos tienden a migrar y acumularse en las puntos de menor presión de la cobertera que les oprime, tales como fallas, diaclasas, pliegues, etc. Ejemplos excepcionales de diapiros con sus típicas estructuras perforantes, formado chimeneas salinas de varios miles de metros, se ofrecen en la Cordillera Cantábrica. Se trata de las evaporitas del Keuper, que se presentan siempre muy deformadas por la halocinesis, formando afloramientos de tipo circular y pocos kilómetros de extensión.

c.- Fenómenos de tipo tectónico y diapírico. Los casos en que paralelamente a una actividad tectónica se inicia un fenómeno de diapirismo son también corrientes. A este respecto especialmente es de destacar el caso de la estructura de plegamiento de la Ribera de Navarra: inicialmente el plegamiento se generó por compresión del Terciario de la Ribera durante el Mioceno inferior, en relación con el levantamiento de la Cordillera pirenaica. Este plegamiento activó una dinámica halocinética que ha condicionado la evolución posterior de la estructura de plegamiento, cuyos efectos se han dejado sentir hasta la actualidad (ver apartado 2.2.1).

Las deformaciones producidas por la tectónica y diapirismo sobre los materiales evaporíticos pueden llegar a destruir totalmente la estructura original del depósito. A nivel macroscópico, las capas se observan intensamente replegadas y las litofacies suelen presentarse también deformadas, por estiramiento o compresión: algunas estructuras aparentemente sedimentarias tienen un origen exclusivamente tectónico (boudinage...), y también ocurre al

revés, estructuras sedimentarias (niveles enterolíticos, "slumps", brechificaciones...) parecen ser producto de la deformación de la roca. A nivel microscópico estos fenómenos se manifiestan también como recristalizaciones, foliación, fracturas, etc.

Es importante, y no siempre fácil, distinguir estas estructuras de origen tectónico o diapírico de las que tienen un origen sedimentario o diagenético, para una correcta interpretación sedimentológica de la formación.

3.4.- PROCESOS DIAGENETICOS TARDIOS: EXHUMACION.

En las proximidades de la superficie, las aguas meteóricas que circulan sobre las formaciones evaporíticas y se infiltra a través de sus discontinuidades, producen la disolución de sus minerales más solubles y la hidratación de otros de sus minerales:

La disolución afecta principalmente a los cloruros (halita), que no llegan a aflorar prácticamente nunca (excepcionalmente afloran algunos niveles de sal en Remolinos), así como otras sales solubles como la glauberita, polihalita, etc., que también llegan a aflorar raramente.

La hidratación afecta básicamente a los sulfatos, y puede manifestarse hasta grandes profundidades (varias decenas o centenares de metros), aunque sólo llega a presentarse de forma generalizada en la zona más superficial de la formación.

El caso más significativo de esta hidratación superficial es la del yeso secundario a partir de anhidrita, que como ya se ha comentado, caracteriza por igual a todas las formaciones de sulfato cálcico que han pasado por anhidrita. También otros minerales evaporíticos, como la glauberita, polihalita y otros, tienden a reaccionar con las aguas para transformarse en yeso secundario, que parece ser la forma de sulfato más estable en superficie.

El estudio comparativo de muestras de anhidrita profunda y yeso secundario superficial de una misma

formación, pone claramente de manifiesto que en la transformación de un mineral a otro no se produce ningún tipo de distorsión o cambio de volumen en la roca. Las mismas estructuras (litofacies, pseudomorfos, etc.) se reconocen con idénticas características en los afloramientos, en yeso secundario o en los testigos de sondeos profundos, como anhidrita.

A nivel petrográfico, esta transformación puede observarse con detalle en sus diferentes grados, desde una anhidrita con algunos porfiroblastos o venas de yeso secundario, hasta un yeso secundario con inclusiones de anhidrita residuales. Toda la secuencia permite ver que la transformación mineral se hace parte a parte, sin cambio de volumen ni deformación de microestructuras. Este hecho se da también por igual en las transformaciones glauberita-yeso secundario o polihalita-yeso secundario, y es de esperar que también ocurra con otros minerales evaporíticos.

El exceso de sulfato cálcico que supone un cambio isovolumétrico de anhidrita a yeso secundario, puede ser el responsable de las abundantes venas de yeso fibroso que rellenan las fisuras y otras discontinuidades de las rocas encajantes en las formaciones evaporíticas. El volumen de sulfato cálcico que representan estas venas es, en muchos casos, realmente considerable a la hora de cuestionarse su procedencia.

Otro componente mineral que con frecuencia está asociado a los afloramientos de formaciones evaporíticas, son las eflorescencias, que recubren las cavidades y otras zonas protegidas del lavado de las aguas de lluvia (foto 27). Estas eflorescencias forman tapices que llegan a tener varios centímetros de espesor, son muy frágiles, de color blanco y de crecimiento relativamente rápido, tal como pone de manifiesto el desarrollo de las mismas en cavidades artificiales realizadas hace pocos años. Normalmente están asociadas a los niveles arcillosos que se sitúan entre capas de yeso (foto 12).

Con el fin de conocer su composición mineralógica, se han analizado por difracción de rayos-X varias muestras de estas eflorescencias, correspondientes a diferentes localidades y formaciones. Los resultados muestran siempre la misma composición mineral, tratándose de hexahidrita ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$). Al microscopio electrónico, estas

eflorescencias se muestran como finos cristales fibrosos, de 4-5 μm de diámetro y 50-100 μm de longitud, que forman una trama inconsolidada y muy porosa de fibras, con disposición desorientada.

El origen de este sulfato magnésico debe estar en relación con el lixiviado de los yesos, que aportan el sulfato, y las arcillas, que aportan el magnesio, o a fenómenos de dedolomitización de carbonatos. No obstante, hasta la fecha son pocos los estudios que sobre este tipo de fenómenos se han realizado (MANDADO et.al., 1984).

Tapizando los niveles de glauberita, en los yacimientos de Alcanadre y San Adrián, también se presentan eflorescencias, en este caso de sulfato sódico, que dan a la roca un color blanco muy intenso, que permite destacar la glauberita del yeso encajante, de color grisáceo.

Figura 18.- Espectros de difracción de rayos-X de carbonatos (calcita, dolomita y magnesita), correspondientes a tres muestras de la formación Lerín.

Figura 19.- Espectros de difracción de rayos-X de sulfatos de calcio, y magnesio (yeso, anhidrita y hexahidrita) correspondientes a muestras de las formaciones Monteagudo, Lerín y Falces.

Figura 20.- Espectros de difracción de rayos-X de sulfatos (glauberita y polihalita) y halita, correspondientes a muestras de la formación Lerín.

