

ROCAS EVAPORÍTICAS

1. INTRODUCCIÓN

Las evaporitas son rocas de origen químico formadas: a) por los minerales yeso, anhidrita y halita, y otros menos comunes pero significativos en cuanto a sus condiciones de formación (salinidad, temperatura); b) por procesos evaporación de salmueras: aguas con abundantes sales en disolución, donde van concentrándose hasta que se saturan y precipitan los minerales evaporíticos; c) en medios marinos específicos: en cuencas litorales restringidas, relativamente aisladas del mar, también pueden darse en cuencas cerradas del interior (lagos alcalinos); d) en ambientes áridos y semiáridos, templados a cálidos: en zonas climáticas de descenso de aire seco, donde la evaporación supera a la precipitación.

Las evaporitas son facies de origen climático bien caracterizadas y homogéneas, mucho menos abundantes que las detríticas y carbonatadas, a pesar de ello tienen gran interés científico y económico. Las rocas resultantes, yesos y sales, muestran aspecto más o menos cristalino, laminado, con señales de deformación plástica, y son de baja dureza, densidad y porosidad.

Abundancia y distribución. Las evaporitas representan alrededor del 3 % de las rocas sedimentarias, se encuentran repartidas de forma irregular en el tiempo, siendo más abundantes en determinadas épocas: Cámbrico, Silúrico, Devónico, Pérmico, Triásico, finales del Jurásico, Eoceno y Mioceno, y aparecen dispersas por toda la geografía terrestre como consecuencia de la migración de los continentes. En la actualidad las evaporitas son muy escasas, todo indica que no precipitan con la misma importancia que en épocas pasadas, tan sólo se observan algunos depósitos lacustres de extensión limitada y naturaleza muy variable (ej.: lagos de África, gran lago salado de Uthan). En consecuencia, los ambientes actuales de depósito no sirven de modelo para explicar las grandes cuencas evaporíticas del pasado.

Forma de Presentarse. Los mayores volúmenes de evaporitas, a veces de 1000 m de potencia y gran extensión lateral, aparecen en secuencias intracratónicas de origen marino situadas en los márgenes continentales en plataformas estables o subsidentes. Suelen presentarse en capas delgadas (100 m), mostrando con frecuencia acusadas laminaciones a escala de centímetros o microscópicas, a veces con estratificación cruzada o gradada, y se atribuyen a depósitos cíclicos, relacionados con variaciones climáticas. Estas rocas pueden estar intercaladas y asociadas a otras rocas: bioquímicas (calizas, dolomías), detríticas de grano fino (lutitas rojas) y margas.

Los cuerpos rocosos raramente afloran, excepto en regiones muy áridas, y se distinguen por sus características específicas en cuanto a su geometría, estructura y alteración. Forman domos de sal de kilómetros cuadrados en superficie y cientos de metros potencia, muestran un aspecto muy deformado con acusada deformación plástica que modifica las estructuras primarias, y presentan su parte superior meteorizada con procesos alteración superficial (disolución de las sales, después de los yesos, reprecipitación y reacciones químicas), dando lugar a rocas complejas y singulares denominadas rocas de cobertera o sombrero ("cap rock").

Posición geodinámica. La situación de las evaporitas en relación con la dinámica terrestre es variable. Pueden presentarse en: a) *Etapas compresivas*, postorogénicas, regresivas, en relación con la segregación, cierre y desecación de cuencas marinas atrapadas en el interior de los continentes; corresponden a épocas de transición del régimen marino al continental (por ejemplo el Mediterráneo en el Mioceno). b) *Etapas estables*, preorogénicas, en plataformas estables o cuencas subsidentes, situadas en los márgenes continentales en ambientes áridos; las evaporitas se presentan ahora interestratificadas con calizas y margas. c) *Etapas distensivas*, de apertura de

continentes, en su etapa inicial (en relación con dorsales abortadas) dentro de cuencas intracratónicas en depresiones limitadas por fallas donde se forman lagos o son invadidas por el mar (como el Mar Muerto), y también en etapas más avanzadas (con desarrollo de corteza oceánica), junto a dorsales intercratónicas situadas en los márgenes continentales (como el Mar Rojo).

La formación de evaporitas puede relacionarse con la dinámica terrestre: con los cambios periódicos que afectan al proceso sedimentario, condicionados a su vez por procesos tectónicos y climáticos. Así, en ciertas épocas se intensifican determinados tipos de rocas, formándose simultáneamente en regiones apartadas de la tierra, los cambios seculares existentes dan lugar a la alternancia de litologías. En este sentido las épocas idóneas para la formación de evaporitas son las etapas regresivas, contrariamente los depósitos de carbón son propios de etapas transgresivas (pueden considerarse depósitos complementarios), y estas épocas con carencia de evaporitas son más favorables para el desarrollo de la vida.

Interés de su estudio. Las evaporitas tienen importantes puntos de interés:

- En las *reconstrucciones paleogeográficas*. Son rocas muy significativas como indicadores de ambientes sedimentarios muy específicos: zonas áridas, de baja latitud, subtropicales (de alta temperatura, baja humedad, baja precipitación). Están asociadas a la finalización de un ciclo de sedimentación normal (regresivo, de colmatación de cuenca o somerización), donde se van superponiendo las distintas litologías: detríticas, calizas, dolomías, yesos y sales.
- Por su *relación con el petróleo*. En ocasiones son rocas fuentes o madre del petróleo, ya que son propias de ambientes reductores (falta de oxígeno) y la ausencia de actividad bacteriana impiden la descomposición de la materia orgánica (sobre todo de las algas generadas en las sabkhas). También intervienen de forma importante en su almacenamiento, puesto que los procesos diapíricos dan lugar a trampas estructurales y, cuando las evaporitas se sitúan a techo, constituyen una cobertera perfecta ya que son rocas impermeables, sellando de esta forma muchos yacimientos petrolíferos de series carbonatadas.
- Como *rocas y minerales industriales* por su interés económico. Los yesos se utilizan en la construcción: directamente como aglomerante o en la fabricación de otros aglomerantes como el cemento, y en la industria química: en la obtención de azufre y todos sus derivados, y como fuente de elementos alcalinos (Na, K) y de halógenos (F, Cl, Br, I). También se relacionan con la génesis de algunos metales: reacciones entre anhidrita e hidrocarburos pueden producir sulfuro de hidrógeno y generar otros sulfuros de baja temperatura. Asimismo los depósitos de sales son muy utilizados en la agricultura y en alimentación.

2. MINERALOGÍA

Los *minerales evaporíticos comunes* o más abundantes son tres, los sulfatos de calcio: yeso y anhidrita y el cloruro de sodio: halita.

Existen otros *minerales evaporíticos* mucho menos frecuentes, conocidos como sales amargas, que son los últimos en cristalizar de las salmueras. Los más importantes, de acuerdo su tendencia a presentarse en ambiente marino o continental, son los siguientes: a) en ambiente marinos los sulfatos: polihalita (con K, Ca, Mg) y kieserita (con Mg), el sulfato y cloruro: kainita (con K, Mg), y los cloruros: silvita (con K), carnalita (con K, Mg), bischofita (con Mg); b) en ambiente continental: los sulfatos: mirabilita y thenardita (con Na), glauberita (con Ca, Na), epsomita y hexahidrita (con Mg), bloedita (con Mg, Na), langbeinita (con Mg, K) y los carbonatos: gaylussita (con Ca, Na), trona y natron (con Na).

Otros *minerales no evaporíticos* pueden presentarse en las rocas siempre en baja proporción, es decir como minerales accesorios, entre ellos los más abundantes son los carbonatos: calcita y dolomita, y los terrígenos: cuarzo y arcillas.

Características distintivas de los minerales evaporíticos.

Yeso (monoclínico): Dureza: 2. Densidad: 2,32. Solubilidad: 2,23 g/l (a 20°C) y comportamiento termófilo (disminuye la solubilidad al aumentar la temperatura). Color: blanco, transparente (selenita). Hábito: prismático (listones), tabular, lenticular, acicular, macla característica (punta de flecha o cola de golondrina). Agregados: granulares, sacaroideos (en alabastros), fibrosos (en relleno de vetas), en roseta (en rosas del desierto), masas micáceas. En el microscopio petrográfico: relieve alto, exfoliación; birrefringencia baja (colores grises).

Anhidrita (rómboico): Dureza: 3,5. Densidad: 2,97. Frágil. Solubilidad: 2,98 g/l (a 20°C) y comportamiento termófilo (disminuye la solubilidad al aumentar la temperatura). Color: blanco, transparente. Hábito: prismático (listones), lenticular. Agregados: granulares, sacaroideo, marmóreo, disposición radial, masas espáticas. En el microscopio petrográfico: relieve alto, exfoliación; birrefringencia alta (colores vivos).

Halita (cúbico): Dureza: 2. Densidad: 2,16. Sabor salado. Higroscópico. Solubilidad: 3.75 g/l (a 0°C) y comportamiento criófilo (aumenta la solubilidad al aumentar la temperatura). Color: blanco, transparente. Hábito: cubos, tolvas (cubos con las caras deprimidas). Agregados: granulares, masivos, microcristalinos; fibrosos. En el microscopio petrográfico: relieve bajo, exfoliación, exfoliación, isótopo.

Formación de minerales evaporíticos: precipitación de salmueras.

Antecedentes: problema genético de las evaporitas.

El análisis químico de las aguas naturales ofrece los siguientes resultados: a) las aguas dulces contienen muy pocas sales, los aniones son: bicarbonatos (58 ppm), sulfatos (12 ppm) y cloruros (7 ppm), y los cationes: Ca (20 ppm), Na (6 ppm) y Mg (4 ppm), b) las aguas marinas son más ricas en sales, los aniones son: cloruros (19.000 ppm) y sulfatos (2.700 ppm), y los cationes: Na (11.000 ppm) y Mg (1.300 ppm), c) las salmueras son soluciones iónicas naturales altamente concentradas, por tanto mucho más ricas en sales, y en cuanto a su naturaleza y proporción muestran grandes variaciones de unas a otras.

La salinidad del agua de mar se cree que ha permanecido constante desde el Cámbrico, esto se atribuye sobre todo a que los episodios evaporíticos extraen sales del agua y controlan su salinidad. Las aguas dulces por el contrario presentan una composición más variable debido a los aportes recibidos de distintas fuentes: meteórica, geotérmica, volcánica o diagenética.

El contenido en sales del agua marina normal es de 35.000 ppm. De acuerdo con esto, una columna de 1000 m de agua sólo contiene 16,5 m de solutos, de los cuales 13 m son de NaCl (78 %) y 0,6 m de CaSO₄ (3.8 %). Por tanto, la evaporación de un determinado volumen confinado de agua de mar es insuficiente para explicar la formación de secuencias evaporíticas con cientos de metros de potencia como se observan en la naturaleza, además algunos de esos depósitos presentan estructuras que son propias de ambientes poco profundos. En consecuencia, los grandes volúmenes de evaporitas sólo pueden darse en cuencas con un notable grado de restricción o aislamiento del mar abierto y que a su vez reciban con frecuencia aportes de agua marina, es decir la evaporación además debe estar acompañada de alimentación.

La diferencia entre evaporitas marinas y continentales es difícil de establecer. Muchas evaporitas marinas se forman en zonas marginales del océano, en los márgenes continentales, y están influidas por aguas meteóricas, por otra parte las evaporitas intracratónicas pueden a su vez proceder de antiguos mares.

Precipitación de salmueras: orden de formación de los minerales.

En el laboratorio experiencias de evaporación en equilibrio estable, con fraccionamiento de los sólidos formados, muestran como al aumentar la evaporación del agua van precipitando los distintos minerales. El orden de formación (inverso a su solubilidad) es el siguiente: a) el agua marina normal está subsaturada en sales, al comenzar la evaporación lo primero que precipita son los óxidos de Fe si los hubiere, b) cuando evapora el 50 % del agua comienzan a precipitar los carbonatos de Ca (0,33 %), c) para el 80 % empiezan sulfatos de Ca (3,6 %), d) para el 90 % el cloruro de Na (78 %) y, e) cuando se alcanza el 94 % precipitan distintos sulfatos y cloruros de Mg, Na y K: primero los sulfatos sin K (bloedita, epsomita), después con K (kainita, kieserita, silvita) y finalmente los cloruros con Mg (carnalita, bischofita).

Los minerales presentados en cada caso dependen: a) de la temperatura de la solución: para cada isoterma hay una serie de minerales estables y al variar cambia la estabilidad mineral y aparecen nuevas fases minerales, b) de los iones presentes en la solución, de su naturaleza y concentración, además si no hay fraccionamiento los precipitados formados reaccionan con las salmueras y los minerales resultantes son diferentes, c) de los mecanismos de cristalización y de la cinética de las reacciones. En consecuencia, conocidos los iones presentes en la solución (saturada siempre en NaCl) y su temperatura, los diagramas de fases permiten establecer las zonas de estabilidad de los distintos minerales evaporíticos, de la misma forma que en los procesos de cristalización de las rocas endógenas.

Al concentrarse las salmueras la formación de nuevas fases minerales no excluye a las precedentes, así el yeso continúa precipitando junto a la halita y ésta sigue formándose hasta el final del proceso evaporítico. Las condiciones de formación de ambos minerales pueden determinarse a partir de su contenido en los elementos traza Sr y Br contenidos en el agua de mar que van quedando concentrados en las salmueras. Ambos elementos no forman minerales específicos, el Sr sustituyen al Ca en el yeso y el Br al Cl en la halita. El contenido de dichos elementos en los minerales depende de la salinidad existente en el momento de su formación: el primer yeso tiene 1000 ppm de Sr y el asociado a la halita 2000 ppm, la primera halita 70 ppm de Br, la asociada a la silvita 260 ppm y a la carnalita 280 ppm.

En la naturaleza las secuencias evaporíticas muestran notables diferencias respecto a los depósitos obtenidos experimentalmente. Esto es debido fundamentalmente a dos hechos: a) los precipitados reaccionan constantemente con las salmueras generando cambios de composición, así es normal el enriquecimiento en Ca por disolución de calizas y la aparición de glauberita y polihalita, b) los procesos evaporíticos se ven con frecuencia interrumpidos. Esto explica que la formación de carbonatos sea muy superior a la de sulfatos y éstos a los cloruros, los depósitos de silvita y carnalita son excepcionales y suelen faltar los sulfatos y cloruros de Mg. Los ciclos evaporíticos normalmente son incompletos por disequilibrios geoquímicos debidos a cambios en la velocidad de precipitación, en la temperatura y en la composición del agua, y también como consecuencia de la diagénesis.

Las secuencias evaporíticas presentan tres grandes zonas muy desiguales en espesor que se corresponden con las principales litologías encontradas en la naturaleza. Interrupciones en la evaporación hacen que, de acuerdo con su abundancia, dichas litologías sean las siguientes: a) series donde el sulfato cálcico es mayoritario o exclusivo: domina la anhidrita con tránsitos en superficie a yeso secundario, b) series en que predomina el cloruro sódico: la halita presentada suele ser muy pura, aunque puede contener pequeñas cantidades de sulfatos o de material clástico, c) series mucho más escasas que contienen potasio: su composición mineral es muy variable, aunque mayoritariamente presentan silvita y carnalita.

3. TEXTURA

Las evaporitas presentan mayoritariamente textura cristalina con notables variaciones en el tamaño, forma (hábito e idiomorfismo) y contenido en inclusiones de los cristales, dependiendo de la especie mineral y de sus condiciones de formación. Excepcionalmente pueden mostrar texturas clásticas en zonas de alta energía, donde la acción de las olas removilizan los cristales. En relación con la etapa de formación de los minerales se pueden distinguir:

a) *Texturas primarias* (sinsedimentarias) cuando los minerales precipitan en el volumen líquido de la salmuera. El crecimiento de los cristales puede tener lugar en el fondo (interfase agua-sedimento) como ocurre para el yeso y la halita, en la columna de agua, o en su superficie (interfase agua-aire) como lo hace la halita. El crecimiento cristalino en el fondo deposicional genera texturas orientadas (alargadas verticalmente) debido a la competencia de espacio. Un crecimiento rápido, en condiciones de elevada sobresaturación, produce cristales de aspecto turbio, consecuencia de su alto contenido en inclusiones. Con frecuencia dicho crecimiento se ve interrumpido de forma cíclica debido a las variaciones de temperatura producidas por la alternancia día-noche.

b) *Texturas cuasiprimarias* (sinsedimentarias) cuando la precipitación tiene lugar intersticialmente, en el seno del sedimento empapado de la salmuera. Ahora los minerales se pueden considerar primarios si crecen por primera vez en espacios vacíos, aunque no lo sean respecto al resto del sedimento ya que se forman después. En estas circunstancias el crecimiento cristalino puede ser: a) desplazativo, ocurre en sedimentos blandos cuando se observan láminas deformadas, b) incorporativo, ahora los cristales engloban sedimento en forma de inclusiones, o c) libre, con los cristales formados en espacios vacíos (poros y fisuras).

c) *Texturas secundarias* (diagenéticas) cuando los minerales se forman posteriormente, por procesos diagenéticos: a) reprecipitación, tras la disolución de los minerales primitivos, b) recristalización, acompañada más o menos de deformación, o c) reemplazamiento. Estos procesos pueden ocurrir en etapas muy próximas al depósito y pueden tener lugar y repetirse varias veces, a veces en sentido opuesto, hasta generar las texturas observadas.

En este sentido, la textura primaria de las evaporitas suele estar oscurecida por la diagénesis, ya que son frecuentes reemplazamientos sinsedimentarios, disoluciones y reprecipitaciones: los minerales que parecen primarios no siempre son los primeros precipitados. Este hecho puede ser detectado por el Br contenido en la halita: cuando es primaria aumenta al avanzar el proceso de cristalización, mientras que si mantiene valores bajos y constantes su origen probablemente es secundario.

4. GÉNESIS DE LOS DEPÓSITOS

Proceso. Las evaporitas se forman por el proceso fisicoquímico de precipitación que tiene lugar en salmueras cuando, como consecuencia de la evaporación, se van concentrando las sales y se supera el producto de solubilidad de un determinado compuesto en la salmuera. Los principales factores que influyen en dicho proceso son:

a) El clima, fundamentalmente la temperatura y la humedad relativa, dada su influencia en la evaporación, y también las precipitaciones. La evaporación debe superar a la precipitación, esto pasa cuando el viento y la insolación son elevadas y la humedad baja: balance hídrico negativo. Las zonas cálidas con viento seco son las más favorables, como son los cinturones subtropicales (30°N y 30°S) donde hay descenso de aire seco, generando las regiones áridas del planeta.

b) Los aportes de aguas de distinta procedencia que puedan llegar a la cuenca que, junto a la evaporación, modifican continuamente la concentración de sales (su naturaleza y cantidad de solutos en el agua). Puede producirse una estratificación de las aguas, permaneciendo en las capas más profundas salmueras frías y densas normalmente de poco espesor.

c) Las características de la cuenca en cuanto a su grado de confinamiento o aislamiento del mar abierto y de alimentación por agua marina o salmueras. El aislamiento de la cuenca puede ser debido a movimientos eustáticos o por subsidencia y la alimentación puede tener lugar de forma más o menos continua superficial o subterráneamente. Esta singularidad de la cuenca es necesaria ya que la evaporación de un volumen determinado de agua de mar resulta insuficiente para la formación de cuerpos evaporíticos como los observados. Así, en cuencas confinadas por una barrera (biológica o clásica) que limite la circulación, donde además de evaporación exista alimentación, puede generarse una crisis de salinidad y prolongarse la precipitación mientras se mantengan esas condiciones.

Modelos de cuencas sedimentarias. Las zonas actuales de formación de evaporitas no sirven como ejemplo para explicar los grandes depósitos del pasado, por lo que se han considerado otras posibilidades que pueden agruparse en tres modelos de cuencas:

1) *Cuencas profundas bajo una gruesa capa de agua.* En este caso se precisa una intensa evaporación para que la columna de agua se sature, haya cristalización y depósito de minerales en el fondo marino. Corresponden a secuencias regulares en aguas profundas (hay ausencia de oleaje) que muestran capas o láminas de evaporitas con gran continuidad lateral, interrumpidas a veces por fenómenos de resedimentación debidos a corrientes de densidad. Los cristales presentan formas relacionadas con su ambiente de formación: la interfase agua-aire (cristales en superficie, que descienden y se acumulan en el fondo) o agua-sedimento (cristales que crecen en el fondo, in situ). La mayoría de los depósitos antiguos corresponden a este tipo.

2) *Cuencas poco profundas bajo una delgada capa de agua.* Dentro de este tipo de cuencas de escasa profundidad (menor de 100 m) se incluyen las grandes sabkhas, playas y lagunes marginales, con depósitos evaporíticos que pueden progradar a mar abierto. Son cuencas subsidentes debido a la masa de sales que cristaliza y donde puede observarse con frecuencia estructuras sedimentarias direccionales de corrientes y olas. Estas cuencas son las más extendidas en la actualidad, pero no parecen que hayan alcanzado gran desarrolladas en el pasado, ya que el gran espesor de los depósitos requiere elevada subsidencia, lo cual no es compatible con el bajo relieve topográfico.

3) *Cuencas profundas bajo una delgada capa de agua.* Cuencas aisladas del más abierto por un umbral pero que permite el flujo periódico de agua marina. Tienen estructuras sedimentarias de inmersión bajo el agua y de resedimentación, con influjo continental considerable en los periodos húmedos dentro del clima árido (ejemplo el Mediterráneo en el Mioceno).

Cada formación evaporítica puede ser un caso diferente, ya que los ambientes de depósito son difíciles de generalizar y tiene lugar muchas excepciones. Esto es debido a los delicados balances existentes entre los flujos de aguas y las etapas de desecación.

Ambientes. Los ambientes evaporíticos actuales no son azoicos aunque, como los salobres, muestran poca variedad de especies. Las condiciones son reductoras (asociadas a la presencia de materia orgánica) que inhibe la formación de carbonatos. También puede darse actividad sulfato-reductora de origen bacterial inhibiendo la precipitación de sulfato cálcico.

Los ambientes evaporíticos son en general subambientes del medio marino, aunque también existen cuencas interiores como los lagos alcalinos. En ambos casos pueden establecerse distintas

zonas, con gradación lateral entre ellas y distinta importancia en cada cuenca, que se caracterizan por distintos mecanismos de formación: a) zonas de lagoon o laguna salada con aguas más o menos profundas, donde la precipitación es subacuática y puede ocurrir en la superficie del agua, en su seno o en fondo, b) zonas de playas y salinas, ahora la precipitación es subaérea y tienen lugar en la superficie formando costras, son depósitos pequeños, c) zonas de sabkhas (salares), donde la precipitación subterránea, intersticial, se produce en el seno de los sedimentos empapados de salmueras que están alimentadas por procesos de capilaridad.

En consecuencia, son rocas que plantean abundantes problemas genéticos: a) el depósito observado es primario o deposicional (generado por precipitación) o secundario o diagenético (resultado de recristalización), b) sus minerales han precipitado in situ o son depósitos clásticos más o menos transportados, c) la precipitación es subacuática (tiene lugar libremente en agua) o es subterránea (en el sedimento, intersticialmente durante la eogénesis), d) los medios de depósito se pueden considerar marinos o continentales, e) los ambientes son de aguas someras o profundas, f) las facies son isocronas o heterocronas con gradientes laterales de salinidad.

5. DIAGENÉISIS Y PROCESOS TECTÓNICOS

La diagénesis es sumamente importante y dilatada en el tiempo, son rocas muy sensibles a las transformaciones tanto épocas tempranas como tardías. Los principales procesos diagenéticos que tienen lugar son la disolución, la recristalización y el reemplazamiento.

Disolución. Las evaporitas están formadas por minerales muy solubles y en presencia de aguas más diluidas que las salmueras generadoras se disuelven. La disolución puede ocurrir en la superficie o en el interior del material, tanto en las primeras etapas (eogénesis) como en las últimas (epigénesis) cuando la roca vuelve a alcanzar la superficie. Tras la disolución puede ocurrir que se existan espacios vacíos en el lugar que ocupan los cristales (pueden contener fluidos acuosos o gaseosos) o que en los espacios vacíos cristalicen minerales de la misma composición que la roca (halita libre de inclusiones sustituyendo a halita lechosa), con la precipitación muy próxima a la disolución (cambios día-noche). La disolución de los niveles más solubles conduce al colapso y brechificación de los estratos suprayacentes, dando lugar a malas correlaciones. En las series que presentan dolomías y yesos asociados, la disolución del yeso con lleva un aporte de Ca a los fluidos, lo que favorece el reemplazamiento de las dolomías y se produce desdolomitización.

Recristalización: En este caso se produce crecimiento cristalino del mismo mineral sin dejar espacios vacíos, se trata de un proceso difícil de distinguir en este tipo de rocas. Los cristales formados son de mayor tamaño, relativamente sucios y más o menos orientados.

Remplazamiento: Ahora tiene lugar la formación de nuevos minerales también sin formación de vacíos (remplazamiento reactivo). Es un proceso común en estas rocas, pueden observarse distintas pruebas de este hecho: cristales pseudomorfs (con morfología que no les corresponde) o relictos de los minerales evaporíticos originales en los minerales remplazados. Por ejemplo, en ambientes supra a intermareales puede encontrarse sílice con forma de nódulos de anhidrita, de cristales lenticulares de yeso o de cubos de halita, también puede formarse calcita y a veces barita por reducción bacteriana de sulfatos en presencia de materia orgánica e hidrocarburos. Otras veces el reemplazamiento es total y genera fábricas propias de reemplazamiento.

Tectónica. En los depósitos evaporíticos o de margas saliníferas la sal guarda poco tiempo sus formas deposicionales (estratos o lentes), al progresar la sedimentación la presión litostática produce reajustes de equilibrio con tendencia a su acumulación y migración hacia la superficie. Las causas son la plasticidad y ligereza (baja densidad) de la sal, siendo estos procesos tanto

mayores cuanto más pura es la sal. De acuerdo con las distintas fuerzas que pueden actuar en el seno de las rocas se producen por diferentes mecanismos:

Presiones isostáticas. Se forman chimeneas por la fuerza ascensional de la sal, debido a las fuerzas gravitatorias que actúan sobre las masas pétreas adyacentes más pesadas. Se forma una primera irregularidad tiende a incrementarse con el tiempo siempre que existe un contraste fuerte de densidad y plasticidad. El ascenso se ve favorecido por la profundidad y diámetro de la chimenea, el movimiento primero tiene lugar lateralmente hacia la base del domo y después cambia de dirección y asciende en capas concéntricas. Se requieren capas potentes de 1000 m. En la parte superior se concentran otros sedimentos y residuos insolubles ("cap rock").

Presiones tangenciales. En este caso se forman cúpulas salinas y chimeneas, siendo las rocas más plásticas (de menor presión de fluencia) las que se desplazan. Se forman pliegues oblicuos (a veces con fallas) concentrándose las sales en las charnelas de los anticlinales, la deformación conlleva un microplegamiento más o menos acusado. También puede producirse la fracturación del zócalo y el plegamiento de la cobertera, entonces la sal va fluyendo hacia el núcleo de los anticlinales que pronto pasan a formar diapiros. La presión orogénica es la causa fundamental del proceso, y la baja densidad de los materiales es un factor que colabora.

Mecanismos intermedios entre presiones isostática y tangenciales. Con frecuencia las presiones tangenciales son el motor inicial del proceso y la isostasia mantiene el movimiento, siendo siempre necesario que se presenten capas potentes.

6. TIPOS ROCOSOS

La precipitación, proceso sedimentario que constituye la génesis las rocas químicas, produce una notable segregación composicional. Normalmente primero se forman los yesos, después los yesos pasas a anhidritas en profundidad y mientras tanto en superficie las últimas en precipitar son las sales. De acuerdo con la composición mineral pueden establecerse esos tres tipos rocosos: yesos, anhidritas y sales. Seguidamente se comentan sus aspectos petrográficos y en menor medida los genéticos (sedimentación y diagénesis).

Yesos. En las series evaporíticas los yesos son las rocas más abundantes en las zonas más superficiales de la corteza (hasta algunos cientos de metros), mientras que en profundidad son inestable y pasan a anhidritas por deshidratación.

El yeso presenta gran facilidad para precipitar, incluso precipita en condiciones de gran metaestabilidad. En experimentos de laboratorio de evaporación de salmueras siempre se obtiene yeso. En la naturaleza el yeso puede formarse en determinados ambientes sedimentarios (yeso primario) y una vez formado su relativamente baja solubilidad explica su abundancia. También puede generarse a partir de la anhidrita cuando ésta asciende a la superficie y deja de ser estable, transformándose en yeso (yeso secundario).

En las rocas el yeso puede presentarse masivo: como un agregado formado por cristales anhedrales, o presentarse en cristales aislados: como porfiroblastos euhedrales de gran tamaño (cm), con frecuencia agrupados en zonas y con inclusiones de minerales terrígenos o salinos.

El yeso primario puede mostrar distintas características en cuanto a su hábito cristalino dependiendo de las condiciones de formación:

- *En la masa de agua libre* los cristales se forman a distintas alturas. Los cristales formados son pequeños, prismáticos, de aspecto más o menos acicular o tabular.

- *Sobre el fondo deposicional* pueden presentarse distintas facies: *Facies de gipsilutitas y gipsarenitas* formadas por cristales pequeños (menores de 2 mm), más o menos prismáticos a equidimensionales, en depósitos laminados o bandeados, a veces con granoclasificación. Los cristales han precipitado en la masa de agua o lo hacen en el fondo y pueden sufrir un cierto transporte (como granos detríticos) y también pueden sufrir disolución por presión con interpenetraciones entre ellos. *Facies gipso-algales* mostrando estromatolitos yesificados, donde existen alternancias de niveles carbonatados algales y yesos. *Facies seleníticas* con formación de grandes cristales (mayores de 2 mm), zonados (contienen inclusiones y son poco transparentes), más o menos idiomórficos, con caras curvas, equidimensionales a elongados y orientados, mostrando crecimiento cristalino antigravitario en el fondo.

- *En el seno del sedimento* donde el crecimiento es intersticial. Los cristales formados son de tamaño variable (mm, dm), tabulares a lenticulares con caras curvas, transparentes a zonados. Pueden aparecer individualizados o entrelazados (como las rosas del desierto) y suelen estar distribuidos en planos preferentes en función de la permeabilidad de las capas.

- *Depósitos detríticos* donde aparecen como granos. Corresponden a *facies de gipsirruditas y gipsarenitas* (a veces situadas dentro de facies seleníticas). Debido a la baja solubilidad del yeso los cristales pueden soportar transportes cortos y mostrar cierto redondeamiento como los granos.

El yeso secundario se origina por reemplazamiento de la anhidrita y tiene lugar en zonas próximas a la superficie, in situ, debido a procesos de hidratación generados por aguas meteóricas en la zona freática, controlados por los planos de mayor permeabilidad (fisuras, diaclasas). Los sistemas de hidratación pueden ser: por venas, concéntrico o masivo formando frentes.

Las texturas y los tipos rocosos son relativamente complejos. Los cristales formados carecen de maclas, pueden tener inclusiones de anhidrita y se distinguen tres tipos extremos:

- Porfiroblásticos: grandes cristales (mm, cm), más o menos euhedrales, aislados o en venas, individualizados (están incluidos en los alabastrinos), oscuros, con zonaciones de crecimiento e inclusiones de anhidrita, pueden ser monocristales o formar agregados fibroso-radiales.

- Alabastrinos (propios de los alabastrinos): son cristales de grano fino (tamaño arena), más o menos equigranulares y anhedral, de color blanco, constituyen la variedad más abundante, de formación más tardía y superficial (forman la matriz de los porfiroblastos).

- Megacrystalinos: grandes cristales (cm, m), blancos a lechosos, más o menos anhedral.

Anhidritas. Son las rocas más abundantes en profundidad puesto que con el soterramiento (algunos cientos de metros) el yeso se vuelve inestable y se transforma en anhidrita. Su aparición en superficie es esporádica, ya que con el tiempo se hidrata y pasa a yeso (yeso secundario), que es la fase mineral estable en superficie.

La anhidrita resulta muy difícil de sintetizar en el laboratorio. En la naturaleza es muy escasa y su precipitación depende de la temperatura y actividad del agua, en ambientes sedimentarios actuales puede encontrarse en cantidades muy pequeñas en lagunas supramareales (como en el Golfo Pérsico). Se presenta en cristales pequeños, descompuestos según láminas de exfoliación. La mayoría de los depósitos de anhidrita pueden incluirse en dos tipos: laminados y nodulosos (o nodulares). En los taludes se pueden observar tránsitos entre facies laminadas y nodulosas junto con estructuras enterolíticas, en relación con procesos de deslizamiento,

Las anhidritas laminadas son de grano muy fino, se encuentran frecuentemente alternado con sales y presentan gran extensión lateral. En la actualidad no se observan por lo que su origen es un problema, pueden considerarse primarias si presentan gran extensión y corresponden a depósitos estacionales (varvas), o secundarias por reemplazamiento de depósitos laminados de yeso cuando muestran pseudomorfos de yeso en los carbonatos asociados.

Las anhidritas nodulosas presentan texturas y estructuras complejas. Entre las estructuras pueden observarse nódulos (mm, m) más o menos verticales, aplastados o compuestos, estructuras enterolíticas (contorsionadas), nódulos poligonales (“chicken wire”), grietas de desecación, estructuras prismáticas con apariencia fluidal. Las texturas son de grano fino, frecuentemente equigranulares, otras veces porfiroblásticas.

Su origen puede ser primario, formada en sabkhas, en medios subaéreos vadoso por capilaridad, donde tienen lugar procesos tempranos de crecimiento diagenético. Las texturas resultantes son muy sensibles a la compactación, muy deformables, como suele ocurrir por deslizamiento en taludes, otras veces la anhidrita puede aparecer como cemento poiquilítico. También puede ser secundario, por reemplazamiento normalmente de yesos durante la diagénesis de soterramiento, mostrando pruebas de ello como son distintos pseudomorfos (lentículas de yeso, rosas del desierto, cristales de selenita), en este caso el ambiente sedimentario no es propio de sabkhas y pueden presentarse oblicuas a la estratificación.

Las anhidritas fibrosas aparecen en facies evaporíticas y a veces también en facies detríticas o carbonatadas, cuando las rocas presentan abundantes espacios abiertos (fracturas) que después se rellenan de anhidrita fibrosa: anhidritas de relleno. En superficie estas anhidritas se hidratan y se forman yesos secundarios sin estructura fibrosa.

Sales. El mineral más abundante es la halita, para su formación es preciso que el proceso evaporítico se mantenga y alcance las facies de cloruros. Suelen ocupar el centro de las cuencas y contener otras sales con los cationes K y Mg.

El hábito de los cristales depende las condiciones de cristalización y ésta puede ser:

- *Libre en la masa de agua.* En este caso cuando la saturación débil se forman cristales cúbicos más o menos perfectos, macizos y transparentes, pero si hay sobresaturación los cubos aparecen deprimidos con huecos en tolva y traslúcidos.
- *En la interfase salmuera-aire,* en ambientes de gran sobresaturación. En estas condiciones se forman pequeños cristales cúbicos que evolucionan a tolvas y se mantienen flotando en superficie por tensión superficial, hasta que forman películas y caen al fondo.
- *En el fondo deposicional.* Además de recoger los cristales anteriores formados en niveles superiores, si la saturación es débil se forman cubos macizos in situ, y cuando es fuerte tienden a crecer las aristas y los vértices de los cristales, dando tolvas de gran tamaño (cm a dm). Los cristales crecen más o menos orientadas, dando lugar a fábricas orientadas, con forma de pirámide invertida (chevron) por desarrollo de uno de los vértices o forma de cubo alargados por desarrollo de una de las caras.
- *En el interior del sedimento,* en ambientes de fuerte sobresaturación. Ahora crecen cristales cúbicos esqueléticos o dendríticos, a veces deformados, frecuentemente se pueden observar como pseudomorfos en calcita, dolomita o sílice, otras veces presentan formas cúbicas de gran tamaño que desplazan el encajante indicando que el crecimiento diagenético es lento y temprano.

La halita puede ser más o menos transparente, en condiciones de sobresaturación aumentan las inclusiones en las salmueras y su aspecto es más traslúcido y blanquecino, este hecho a veces solo afecta a una parte del depósito (el núcleo). Las rocas salinas pueden ser bandeadas, algunas halitas de origen profundo aparecen bandeadas por alternar halita transparente y halita con inclusiones, también hay formaciones antiguas con sales muy puras que presenta bandeados (de cm a dm) debido a la existencia de niveles de insolubles, como ocurre en los depósitos cíclicos de arcillas y sulfatos.