

# Problemas geotécnicos asociados a la presencia de sulfatos sódicos. Un enfoque mineralógico

## *Geotechnical problems related to the presence of sodic sulphates. A mineralogical approach*

Cristina de Santiago Buey<sup>1\*</sup>

### Palabras clave

glauberita;  
tenardita;  
mirabilita;  
sulfatos sódicos;

### Resumen

El principal propósito de este artículo es ofrecer una información geológica básica sobre las glauberitas y los sulfatos sódicos con el fin de comprender mejor los fenómenos geoquímicos y mineralógicos que se encuentran detrás de algunos problemas geotécnicos hallados durante la ejecución de una obra civil. Las formaciones evaporíticas que ocuparon las grandes cuencas continentales de la Península Ibérica durante el Mioceno superior (Terciario) contienen frecuentemente unidades glauberíticas (con sulfatos sódicos) en sus partes centrales. Estas unidades glauberíticas comprenden capas de tenardita y glauberita en la base y yeso cristalino en el techo. Cuando las glauberitas quedan expuestas a las condiciones atmosféricas debido a la ejecución de obras de ingeniería civil, se transforman en yeso secundario y algún tipo de sulfato sódico, siendo la fase anhidra (tenardita), la más común y la fase decahidratada (mirabilita), la fase estable en condiciones de humedad relativa superiores al 40-50%. Tradicionalmente se ha considerado que los daños sufridos en obras son debidos al aumento de volumen asociado a la reacción de hidratación de la tenardita para transformarse en mirabilita. Sin embargo, recientemente se ha reconocido que el efecto destructivo de estos minerales se debe a la nucleación y crecimiento de cristales, tanto de tenardita como de mirabilita, a partir de soluciones supersaturadas que se originan a partir de la disolución de sulfatos previos como tenardita o glauberita. Este proceso puede generar fuertes presiones de cristalización que produce el deterioro de los materiales porosos como rocas naturales o los propios materiales de construcción. Resulta fundamental evaluar y caracterizar correctamente este proceso de daño geológico, con el fin de identificar, remediar o incluso evitar problemas geotécnicos en estas unidades glauberíticas.

### Keywords

glauberite;  
thenardite;  
mirabilite;  
sodium sulphates;

### Abstract

*The main purpose of this paper is to offer some geological background in the field of glauberites and sodium sulphates in order to better understand the geochemical and mineralogical phenomena taking place behind the geotechnical problems found during some recent infrastructure construction works. The evaporitic formations accumulated in the large non-marine sedimentary basins of the Iberian Peninsula during the Upper Miocene (Tertiary), commonly have glauberitic units (units bearing sodium sulphates) in their central parts. These glauberitic units comprise thenardite-glauberite layers at the base and crystalline gypsum at the top. When glauberitic materials get exposed to atmospheric conditions due to infrastructure construction works, they undergo mineral transformation to secondary gypsum and sodium sulphate phases, the anhydrous phase being the most common,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (thenardite), while sodium sulfate decahydrate— $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  (mirabilite) is the stable phase at relative humidities higher than 40-50%. For a long time, damage was attributed to the volumen increase associated with the hydration reaction of thenardite to become mirabilite. More recently it was recognized that the destructive effect is attributed to the cristal growth of thenardite or mirabilite crystals from highly supersaturated solutions originating from the dissolution of previous sulphate crystals, such as thenardite or glauberite. This process can generate severe large crystallization pressure, resulting in porous materials damage i.e. natural rocks and construction materials decay. Assessment and characterization of this active damage processing is crucial to identify, remediate or even avoid potential geotechnical problems in this glauberitic units.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En ocasiones las obras civiles se construyen en el seno de materiales geológicos extremadamente sensibles al equilibrio físico-químico de su entorno. La propia construcción

de la obra provoca desequilibrios que desencadenan evoluciones mineralógicas más allá del proceso de ejecución, a lo largo de la vida útil de la misma. Resulta fundamental adaptarse a las nuevas condiciones creadas durante estas transformaciones geológicas, que generan a su vez importantes cambios volumétricos o en las propiedades geotécnicas de la roca. De no ser capaces de prever esta transformación dinámica y sus repercusiones mecánicas,

\* Autor de contacto: [cristina.desantiago@cedex.es](mailto:cristina.desantiago@cedex.es)

<sup>1</sup> Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Madrid, España.

los cambios pueden resultar fatales para la obra, su vida útil o su seguridad.

Uno de los materiales geológicos más activos en este sentido es el conjunto de minerales que se encuentran en la naturaleza en las denominadas unidades glauberíticas. Se trata, en sentido amplio, de sulfatos de sodio y calcio, asociados generalmente a otras sales como el cloruro sódico, con una elevada capacidad corrosión y de interacción con el agua, ya sea mediante su disolución o mediante su hidratación y consecuente cambio de volumen asociado. De todos los minerales presentes en estas asociaciones, la glauberita es el mineral omnipresente y, sin duda, también el más abundante, lo que ha llevado a denominar a estos materiales “unidades glauberíticas” (Ortí, 2000).

Ante la posibilidad de atravesar una unidad glauberítica, resulta crucial conocer la naturaleza específica y abundancia relativa de las sales presentes en la naturaleza, dado que van a determinar en gran medida las precauciones que deben plantearse durante la fase de diseño y llevarse a cabo durante la ejecución y toda la vida útil de la obra si se quiere garantizar su seguridad. El problema surge cuando la ausencia de conocimientos sobre estos materiales provoca una caracterización geológica deficiente con denominaciones y descripciones genéricas que no definen el tipo de sales presentes en la zona de obra.

El objetivo fundamental de este artículo es aportar nociones elementales sobre los materiales glauberíticos, su mineralogía y los fenómenos físico-químicos asociados a ellos. Esta aproximación geológica a las glauberitas permitirá a los profesionales de la ingeniería en España comprender mejor su origen geológico, su mineralogía y su comportamiento en función de las variaciones de presión, temperatura y humedad relativa. De esta forma, es posible abordar con mayor seguridad y conocimientos el diseño de infraestructuras a través de estos complejos materiales. Para ello, se hace referencia a un estudio realizado en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX con el fin de facilitar asesoramiento geotécnico en un tramo de la LAV Madrid-Valencia.

## 2. PLANTEAMIENTO DE UN PROBLEMA GEOTÉCNICO EN GLAUBERITAS

En enero de 2010, tras un periodo de dos meses de fuertes lluvias, nevadas y temperaturas bajas, se detecta, en un tramo de la LAV Madrid-Valencia, una elevación de la vía ferroviaria totalmente terminada y lista para su puesta en servicio, así como una expansión del material de la parte inferior de los taludes del desmonte y un gran deterioro en la cuneta de todo el tramo. El sustrato sobre el que se dispone esta infraestructura se encuentra ubicado en la Unidad Salina del Mioceno Inferior de la Cuenca del Tajo, una de las principales unidades glauberíticas de la Península Ibérica.

Durante la construcción de este tramo, se ejecutaron unos desmontes en formaciones yesíferas en los que se apreciaron algunos síntomas de incorrecto comportamiento geotécnico, como son la alteración de los primeros centímetros de la cara externa de los taludes y la consiguiente recristalización de fases salinas en los derrubios del talud (figura 1) y la aparición de agrietamientos en las cercanías de la plataforma ferroviaria y levantamientos de dicha plataforma (figura 2).



**Figura 1.** Aspecto de la cara del desmonte con recristalización de fases salinas.



**Figura 2.** Detalle de agrietamientos y recristalizaciones en las cercanías de la plataforma ferroviaria.

Es necesario comprender cuanto antes los fenómenos que están siendo observados en campo, con el fin de evitar que continúen afectando a la infraestructura y minimizar futuros riesgos que pongan en peligro el estado o la vida útil de la misma.

### 3. EXPERIMENTACIÓN DE LABORATORIO

Se llevaron a cabo dos calicatas en la plataforma ferroviaria con objeto de observar el estado de dicha plataforma y del terreno natural de apoyo, así como para recoger muestras para su posterior ensayo en laboratorio. El perfil geológico-geotécnico reconocido en estas calicatas, junto con la composición mineralógica determinada mediante difracción de rayos-X, permite identificar cuatro niveles de techo a muro.

- Un “nivel superficial de coronación” de la plataforma, de unos 60 cm de espesor y conformado por arenas y gravas de colores anaranjados. Las muestras procedentes de la coronación pueden ser consideradas inertes desde el punto de vista mineralógico, estando formadas principalmente por cuarzo, feldespatos y calcita, con áridos de tamaño grava de composición silícea (cuarzo) o carbonática (calcita).
- Una “Capa blanda” negra, saturada, que presenta nódulos subredondeados de yeso y glauberita de tamaño centimétrico. Compuesta fundamentalmente por yeso (hasta un 96%), con presencia de tenardita, magnesita e indicios de cuarzo y filosilicatos de la familia de las micas-illitas.
- Un “Sustrato alterado”. Se trata del terreno natural, que en su nivel superior se encuentra visiblemente alterado. Compuesto principalmente por yeso, tenardita y glauberita dentro de una matriz margosa.
- Un “Sustrato sano” en estado saturado. Se trata de sedimentos de origen evaporítico y composición variable de yeso, tenardita, glauberita, e indicios de cuarzo y filosilicatos de la familia de las micas-illitas.

Con el fin de comprender mejor el funcionamiento de las relaciones entre estos minerales, se han realizado una serie de sencillas observaciones de laboratorio:

- En primer lugar, a diferencia del resto de las muestras de laboratorio, que se secaron al aire, se introdujo una muestra correspondiente al sustrato sano en el interior de una cámara húmeda, en condiciones de humedad relativa cercanas al 100%, con el objetivo de analizarla en estado saturado.
- En segundo lugar, se decidió secar al aire una muestra y analizar la evolución de su superficie a medida que se evapora el agua en condiciones atmosféricas.
- Por último, se introdujo una muestra en agua, analizando su comportamiento en términos de disolución y posterior precipitación de fases cristalinas.

#### 3.1. Análisis de muestra en estado saturado

Ante la posibilidad de encontrar sulfatos solubles sensibles al estado de saturación, se consideró la posibilidad de almacenar una muestra extraída del sustrato sano en

cámara húmeda, en condiciones de humedad relativa cercana al 100%, y analizarla en estado saturado.

Esta muestra fue analizada mediante difracción de rayos-X para conocer su composición mineralógica en estado saturado, lo que permitió detectar la presencia de un 18% de mirabilita. Por el contrario, el resto de muestras, que fueron secadas al aire, no mostraron la más mínima presencia de este mineral. Ello es debido a que, como se desarrollará más adelante, en condiciones de elevada humedad relativa, la mirabilita se mantiene estable, pudiendo ser detectada por el difractómetro. En las muestras que fueron secadas al aire, la mirabilita, inestable en condiciones de humedad relativa inferior al 70-75%, se transforma a tenardita, su equivalente anhidro, siendo ésta última la fase que siempre se detecta en los difractogramas.

Esta simple prueba de laboratorio, abre la reflexión sobre el hecho de en ninguna de las muestras se detecta glauberita a pesar de conocer con seguridad la fuerte presencia de glauberita en el sustrato sano. Sin embargo, como se verá más adelante, la glauberita es un mineral inestable en condiciones de exposición aéreas y presencia de flujos de agua, tendiendo a transformarse por disolución incongruente en yeso secundario y liberando en el proceso el exceso de sulfato sódico, que precipita en forma de tenardita o mirabilita que, a su vez, al ser inestable en condiciones de humedad relativa inferiores a 70-75%, se transformará inmediatamente en tenardita. Esta es la razón por la que en superficie se detecta siempre la presencia de tenardita y yeso secundario mientras que en profundidad el material rocoso puede contener glauberita o mirabilita.

#### 3.2. Secado al aire y alteración superficial de las muestras

A raíz de las observaciones realizadas, se estimó oportuno estudiar la evolución de los fragmentos rocosos procedentes del sustrato sano, compuestos por yesos, thenardita y glauberita, al ser expuestos a condiciones ambientales. Para ello se fracturó una muestra correspondiente a sustrato sano y se observó la evolución del material a lo largo de una semana. En la figura 3 se observa el aspecto de la muestra, inicialmente de color negro, tras dos horas de exposición aérea. Tras este periodo de tiempo, los fragmentos aparecían cubiertos por una espesa capa de polvo blanco, fruto de la exudación de la roca y la posterior evaporación del agua provocando la cristalización del sulfato.

La reacción observada parece corresponder a una evaporación del agua en superficie que mantenía saturadas a las rocas, provocando la precipitación del sulfato sódico en forma de tenardita o mirabilita.

El análisis mediante difracción de rayos-X demostró que el polvo blanco precipitado en la superficie de la roca, estaba compuesto predominantemente por tenardita (70%) asociada a una menor proporción de yeso (30%). Cabe destacar que este procedimiento no permitió distinguir el origen de la tenardita, que pudo haber precipitado directamente por evaporación del agua en la superficie de las rocas o pudo haberse generado por transformación de la mirabilita, inestable en condiciones de humedad relativa por debajo de 70-76%, como se razonará más adelante.



**Figura 3.** Muestra de sustrato tras dos horas de exposición aérea.

### 3.3. Disolución-precipitación de las muestras

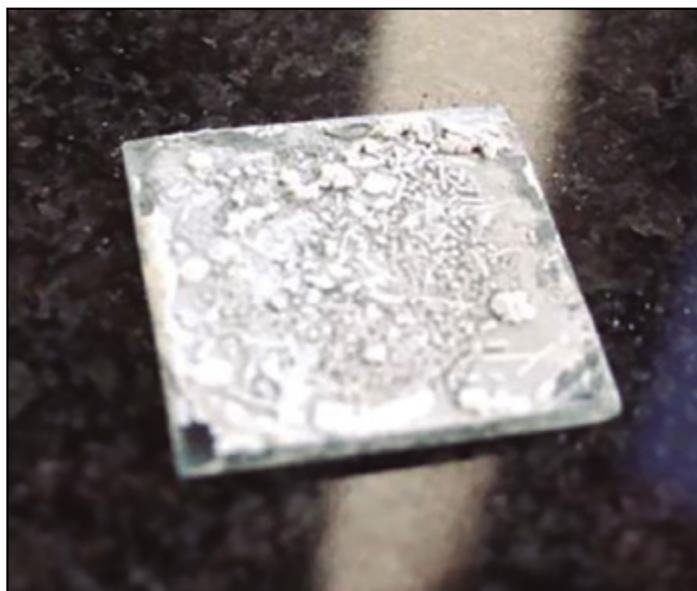
A la vista de la espectacular reacción en las superficies frescas de fractura por exposición atmosférica, se procedió a saturar de agua un fragmento de roca procedente de la muestra de sustrato sano. El objetivo de este ensayo era observar la reacción de la roca en contacto con agua. La roca reaccionó disolviéndose en el acto, dejando una solución sobresaturada en sulfato sódico y cálcico y un sedimento negro de yeso en el fondo del recipiente. A continuación se pipetearon unas gotas de la disolución de agua y se depositaron sobre un vidrio, dejando evaporarse el agua en condiciones ambientales. A medida que el agua se evaporaba, se fue produciendo la cristalización de una sustancia blanquecina, que cubría el vidrio al cabo de dos horas (figura 4).

En el momento en que comenzaron a verse cristales, se realizó sobre el vidrio una secuencia de 20 análisis consecutivos de difracción de rayos-X a temperatura ambiente, con el fin de detectar los posibles fenómenos de cristalización y transformación mineral que tuvieran lugar sobre

la superficie. Cada barrido supuso un tiempo de 45 minutos. En la figura 4 se muestran los 20 difractogramas superpuestos.

En primer lugar se observa en los barridos 1 y 2 una prominencia localizada en torno a  $5^{\circ}2\theta$  que se debe a la presencia de agua en la muestra, lo que demuestra que el material se encontraba todavía en estado húmedo. Los barridos posteriores ya no presentan este efecto, debido al secado y evaporación del agua durante el análisis. La presencia de agua en los barridos 1 y 2 es coherente con la presencia de los picos característicos de la mirabilita (fase hidratada del sulfato sódico) que aparece como mineral predominante acompañado de tenardita y yeso en menor proporción.

Los barridos posteriores, del barrido 3 hasta el barrido 20, coinciden exactamente en su perfil. Todos ellos presentan una ausencia del efecto del agua a  $5^{\circ}2\theta$  a la vez que evidencian una transformación de la totalidad de la mirabilita presente en tenardita por deshidratación. Las reflexiones características de la mirabilita han desaparecido por completo mientras que las reflexiones de tenardita se han



**Figura 4.** Vidrio donde se depositaron algunas gotas de disolución de una roca M-5.

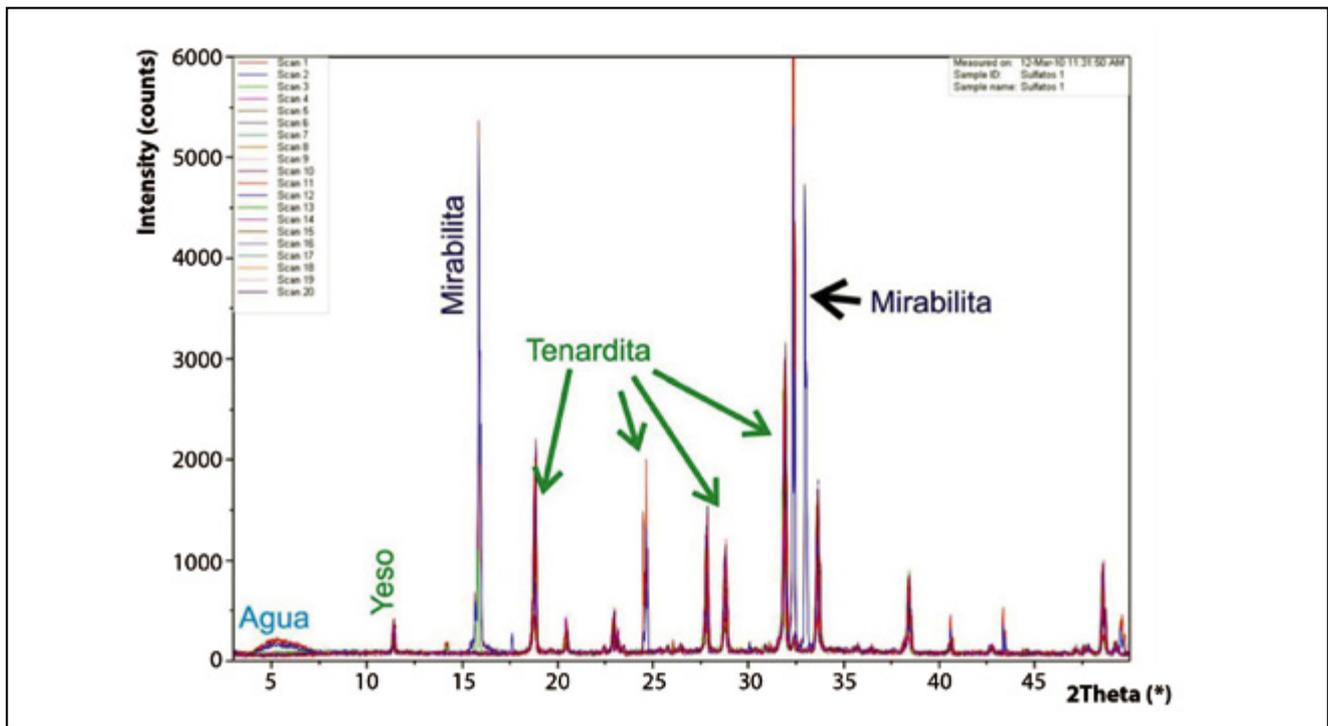


Figura 5. Difractogramas de rayos-X de los cristales precipitados en el vidrio y su evolución con el tiempo.

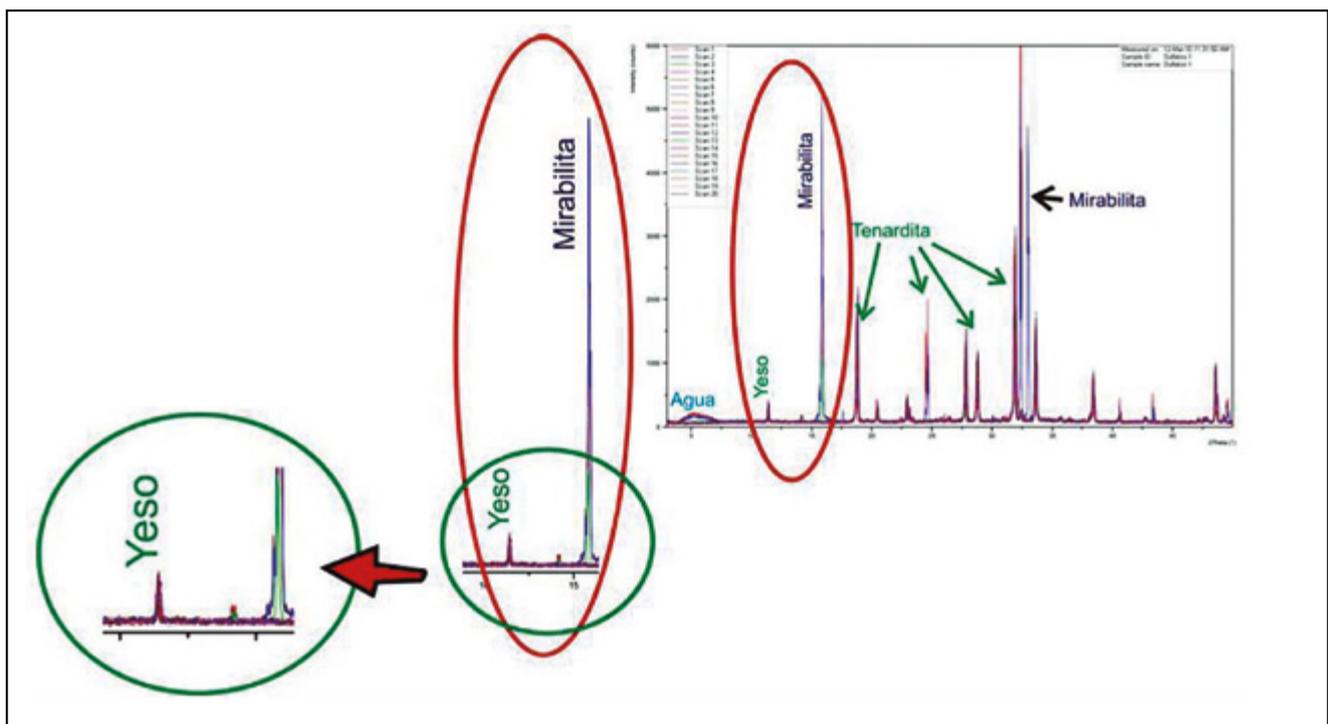


Figura 6. Fragmento de los difractogramas comprendido entre 10 y 20°2θ.

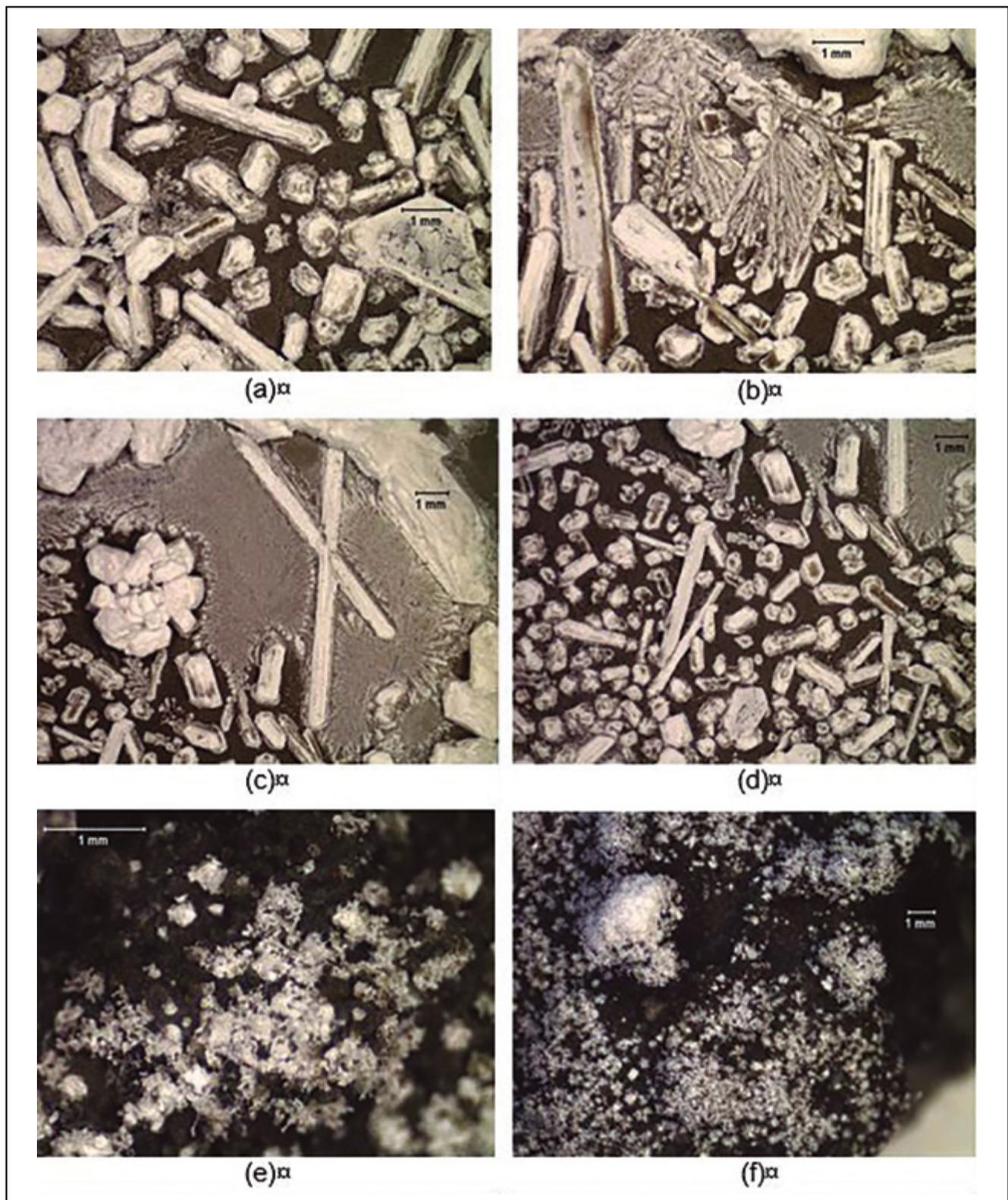
reforzado y aumentado de intensidad. Dado que cada barrido supuso un lapso de tiempo de 45 minutos, se puede estimar que la muestra sufrió una transformación completa al cabo de una hora y media (dos barridos completos).

En la figura 6 se muestran ampliados dos fragmentos del difractograma donde se observan las reflexiones de la mirabilita presentes en los barridos 1 y 2 y su completa desaparición en todos los barridos posteriores.

Como ha quedado demostrado mediante difracción de rayos-X, la precipitación directa a partir de una solución saturada en sulfato sódico genera la cristalización de mirabilita y tenardita. En un plazo de tiempo muy breve (una

hora y media), por efecto de la evaporación hasta sequedad, la mirabilita pierde sus moléculas de agua transformándose en tenardita. Esta transformación implica que la morfología inicial de los cristales primarios de mirabilita permanece, aunque éstos se hayan alterado a tenardita por deshidratación (Linnow et al., 2006).

Para observar este fenómeno se han realizado una serie de micrografías mediante lupa binocular (figura 7), donde se puede observar los cristales de hábito tabular, que permiten identificar a la mirabilita y el hábito prismático y aspecto de polvo masivo característico de la tenardita, junto con los abanicos de cristales aciculares de la fase III (fase



**Figura 7.** Cristales de mirabilita y tenardita observados tras la evaporación del agua.

metaestable de sulfato sódico, tal como se explica posteriormente en el capítulo siguiente).

Las micrografías han sido tomadas mediante un estereomicroscopio modelo STEMI 2000-C, CARL ZEISS con campo visual ultragrande de 23 mm, al que se le ha acoplado un sistema de captura digital de imagen en color de alta resolución, modelo SPOT RT220-3 KAI 2092.

Esta secuencia de fenómenos de cristalización y transformación es relativamente rápida, teniendo lugar en lapsos de tiempo que oscilan entre segundos y horas, en

función, entre otras variables, de la velocidad de evaporación, la humedad relativa ambiental y la velocidad de aire.

Tras un primer acercamiento a la problemática presente en las muestras objeto de estudio, se considera que ésta está fuertemente asociada a los fenómenos involucrados en la alteración de la glauberita y la cristalización y crecimiento de las fases cristalinas del sulfato sódico: la fase anhidra conocida como tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y su correspondiente fase decahidratada, conocida con el nombre de mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

#### 4. ALGUNOS APUNTES GEOLÓGICOS Y MINERALÓGICOS DE LAS GLAUBERITAS

En este apartado se resumen los conceptos geológicos más importantes que gobiernan la presencia de glauberita en algunas localidades de la península ibérica, junto con los fenómenos cristalquímicos que tienen lugar durante los procesos dinámicos de cristalización y transformación mineralógica de estos sulfatos.

##### 4.1. Ubicación geográfica y geología de las unidades glauberíticas en España

Ortí (2000) propone el término “unidades glauberíticas” para referirse, en sentido amplio, a los núcleos de formaciones evaporíticas de centro de cuenca que están dominados por alguno o algunos de los principales minerales de sulfato sódico, como son glauberita, tenardita y mirabilita, acompañando a los sulfatos cálcicos y, en ocasiones, también al cloruro sódico (tabla I). De todos estos sulfatos con sodio, la glauberita es el mineral omnipresente y, sin duda, también el más abundante.

**Tabla 1.** Minerales evaporíticos potencialmente asociados a la glauberita en unidades evaporíticas (Ortí, 2000)

Carbonatos	Calcita	$\text{CaCO}_3$
	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Magnesita	$\text{MgCO}_3$
Sulfatos	Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Anhidrita	$\text{CaSO}_4$
	Glauberita	$\text{CaNa}_2(\text{SO}_4)_2$
	Mirabilita	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	Tenardita	$\text{Na}_2\text{SO}_4$
	Hidroglauberita	$\text{CaSO}_4 \cdot 1,6\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$
	Bloedita	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Polihalita	$\text{K}_2\text{MgCa}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Cloruros	Halita
Carnalita		$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Bischofita		$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Kainita		$\text{K}_2\text{Mg}_4\text{Cl}_4(\text{SO}_4)_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$

Los datos isotópicos indican que el ión sulfato de estos materiales proviene, principalmente, del reciclado de sales triásicas, Cretácico superior y Paleógeno (Utrilla et al., 1991, 1992; Ordóñez y García del Cura, 1992).

Resulta muy habitual encontrar la glauberita asociada a **carbonatos**. De entre ellos, la magnesita es el carbonato más frecuente, que suele aparecer en alternancias de laminaciones milimétricas.

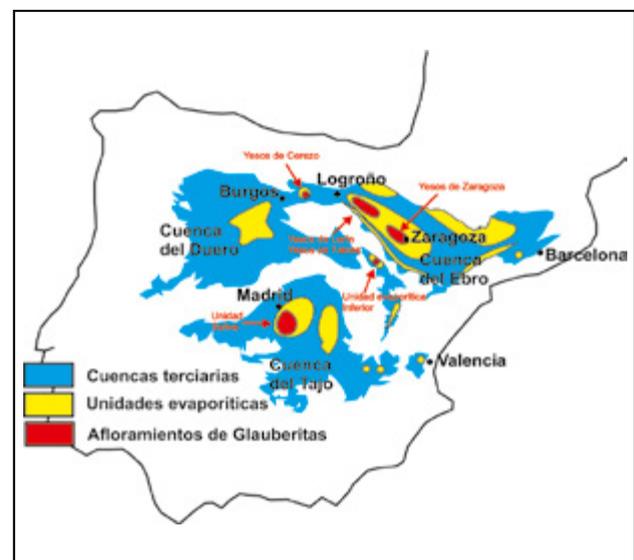
En ocasiones se presentan, a mayor escala, alternancias entre potentes capas de glauberita y capas de **lutitas** con nódulos de anhidrita. Estas asociaciones permiten pensar en un ambiente deposicional alternante entre lagos glauberíticos y episodios de llanura lutítica salina, con pérdida del cuerpo de agua aflorante (el más intensamente evaporítico), la dilución general del sistema hidrológico (que pasa a mantenerse como subterráneo), y la precipitación evaporítica (García del Cura et al., 1986).

También se describen alternancias de glauberitas con **yesos**, que pueden interpretarse como episodios de lago diluido y somero (láminas de yeso), seguidos de episodios lacustres de mayor concentración (glauberita) y menor profundidad de agua. Cuando aparecen **anhidritas** laminadas, se interpretan como creadas a partir del yeso mediante procesos de diagénesis.

Se han descrito en diversas cuencas de la península alternancias entre capas de glauberita y capas de **tenardita**. En todos los casos, la tenardita cementa o reemplaza a la glauberita y, en general, el reemplazamiento parece ser diagenético relativamente temprano. Se deduce que la tenardita se produce por reemplazamiento de un mineral precursor, que presumiblemente es mirabilita (Ordóñez et al., 1977, 1991; Ordóñez y García del Cura, 1992; Ortí et al., 1979).

En cualquier caso, las fases minerales de las unidades glauberíticas presentan texturas cristalinas muy variadas, con tamaños desde muy finos (microcristales de  $< 30 \mu\text{m}$ , o “matriz glauberítica”) hasta relativamente gruesos (cristales macroscópicos que alcanzan los 5-10 cm).

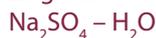
En los últimos años se ha realizado una progresiva identificación de unidades con minerales de sulfato sódico intercaladas en el seno de las grandes formaciones evaporíticas que ocupan los centros de las cuencas terciarias de la Península Ibérica. Los más importantes se encuentran en la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo (sector occidental o Cuenca de Madrid), en los sectores riojano y burgalés de la Cuenca del Ebro, en la Cuenca de Calatayud y las cercanías de Zaragoza (figura 8).



**Figura 8.** Situación de las principales unidades glauberíticas en la península ibérica (modificado de Ortí, 2000).

En general, estas unidades tienen carácter de yacimiento, y diversos trabajos han puesto de manifiesto su importancia económica (Ordóñez y García del Cura, 1992). De hecho, España es el único país de la Unión Europea con minas de sulfato sódico (fundamentalmente tenardita, glauberita y mirabilita) y el segundo del mundo, sólo superado por China, lo que da una idea de la gran importancia económica de estos materiales.

## 4.2. La glauberita y las fases cristalinas del sistema



La **glauberita** es un sulfato sódico-cálcico ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ ) cuya denominación se debe a su contenido de sulfato sódico ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), antiguamente conocido como «Sal de Glauber», recibiendo este nombre por el alquimista alemán Johann Rudolf Glauber (1604-1668). La glauberita es incolora o de color claro y cristaliza en el sistema monoclinico, formando cristales de hábito prismático- tabular (Klein y Hurlbut, 1998). Es un componente común de depósitos de evaporita continentales y marítimos, donde aparece asociada con otros minerales de carácter evaporíticos como se ha explicado anteriormente.

Genéticamente asociados a la glauberita, se encuentran los sulfatos sódicos cuya complejidad cristalográfica y estabilidad físico-química hacen que se haga necesario para su estudio definir el sistema  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ , que incluye varias fases cristalinas de las cuales únicamente dos son estables:

- Cinco polimorfos de sulfato sódico anhidro (Eysel, 1973; Naruse et al., 1987):
  - Fase (I): Polimorfo estable en condiciones de temperatura superior a 270°C.
  - Fase (II): Polimorfo estable en condiciones de temperatura superior a 225°C. Presenta un campo de estabilidad muy reducido.
  - Fase (III): Polimorfo estable en condiciones de temperatura superior a 207°C.
  - Fase (IV): Polimorfo metaestable de estructura y condiciones de estabilidad desconocidas todavía.
  - Fase (V): Estable a temperatura ambiente y conocida con el nombre de **tenardita** (Amirthalingam et al., 1977). La tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), que debe su nombre al químico francés Louis Jacques Thenard (1777-1826), aparece en sedimentos depositados en ambientes lacustres de clima árido. También se ha descrito su presencia en cuevas y antiguas minas, como eflorescencias o depósitos en forma de costras alrededor de fumarolas.
- Una fase heptahidratada metaestable ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) que puede precipitar a temperaturas por debajo de la temperatura de transición tenardita-mirabilita pero es una fase metaestable en la naturaleza (Braitsch, 1971).
- Una fase decahidratada conocida con el nombre de **Mirabilita** ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ). La mirabilita es una fase mineral inestable en condiciones ambientales y rápidamente se deshidrata. Los cristales prismáticos se transforman en un polvo blanco compuesto por microcristales de tenardita, su equivalente anhidro.

## 4.3. La alteración de los depósitos glauberíticos

En superficie, la glauberita rara vez se conserva como tal mineral, alterándose inicialmente mediante la formación de una pátina superficial blanca, por disolución

incongruente<sup>1</sup> del sulfato sódico. Las formaciones alteradas de glauberita pueden reconocerse en afloramientos muy frescos y recientes como pseudomorfos en yeso secundario, tanto de la variedad alabastrina como de la megacristalina.

Tradicionalmente se considera que la glauberita se altera como una disolución incongruente donde el sulfato sódico es eliminado, dejando un residuo de sulfato cálcico en forma de yeso secundario. Esto es probablemente el caso cuando la hidratación se realiza de un modo rápido en superficie, o cuando un importante flujo de agua subterránea circula a través de una formación glauberítica. Como consecuencia, la glauberita se disuelve y una eflorescencia blanca de sulfato sódico se hace visible en los afloramientos.

Muchas observaciones hechas en los depósitos glauberíticos peninsulares sugieren que ésta no es necesariamente la regla general. En efecto, en muchos afloramientos, galerías de mina y muestras de sondeo es frecuente observar que la glauberita ha sido totalmente reemplazada por yeso secundario. Similares observaciones fueron hechas por García del Cura et al. (1979) en la cuenca del Tajo. Normalmente, este proceso de reemplazamiento opera con preservación de la litofacies glauberítica. Las texturas de yeso secundario que proceden del reemplazamiento de la glauberita pueden ser de grano fino, pero frecuentemente son megacristalinas.

Adicionalmente, el estudio petrográfico de muestras de sondeo revela que la transformación final de sulfatos como anhidrita, glauberita y polihalita en yeso secundario es un proceso corriente que ocurre isovolumétricamente, ya que el exceso de ión sulfato es eliminado en solución, preservando así la litofacies.

La viabilidad de tal proceso puede ser entendida si se considera que, muy probablemente, toda agua subterránea que afecte a una paragénesis de glauberita del tipo considerada, estará saturada en sulfato cálcico e infra-saturada en sulfato sódico. En efecto, estas formaciones están dominadas por la presencia de grandes volúmenes de sulfato cálcico entre los que los sulfatos sódicos se intercalan en cantidades relativamente pequeñas. En tales condiciones, el agua meteórica se saturará progresivamente en yeso, no sólo por la disolución de ciertas cantidades de yeso y anhidrita, sino también por el importante exceso de sulfato cálcico liberado en la hidratación de la anhidrita en yeso secundario. Adicionalmente, otros minerales sulfatados con solubilidad limitada, como glauberita y, en parte polihalita, pueden ser reemplazados más o menos extensivamente por yeso secundario, mientras que la tenardita y la halita serán más fácilmente disueltas.

Este reemplazamiento de glauberita por yeso secundario a gran escala significa que, en afloramiento, una capa particular de yeso secundario proveniente de aquella puede ser fácilmente confundida con otra que provenga de la hidratación de la anhidrita. También existe una similitud bastante sorprendente entre los cristales macroscópicos de yeso crecidos intersticialmente (prismáticos, dispuestos en

<sup>1</sup> *Disolución incongruente*: disolución selectiva del material o fase sólida, por lo que el mineral cambia su composición, bien sea porque sólo se ha disuelto parte de sus componentes o porque el mineral reacciona con iones presentes en el fluido del poro (Pettijohn et al., 1973)

rosas del desierto, etc.) y las mismas ocurrencias para la glauberita.

#### 4.4. Relaciones de transformación tenardita-mirabilita

Los fenómenos de nucleación, cristalización y transformación de fases que tienen lugar a partir de la evaporación de soluciones ricas en sulfatos y en sodio constituyen un sistema muy dinámico, en continuo cambio y susceptible de numerosas variaciones en función del grado de sobresaturación de la solución, la velocidad de evaporación, la temperatura y la humedad relativa.

La tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) es la fase estable anhidra y precipita directamente a partir de una solución en condiciones de temperaturas superiores a  $32,4^\circ\text{C}$  (Linke, 1958; Arnold, 1976; Rodríguez-Navarro et al., 2000). Por debajo de esta temperatura, la mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) es la fase que precipita, aunque rápidamente se transforma en tenardita si la humedad relativa se encuentra por debajo de 71% (a

$20^\circ\text{C}$ ) (Arnold, 1976). Por el contrario, la tenardita es capaz de transformarse en mirabilita si la humedad relativa asciende por encima de 71%. En la figura 9 se muestra el diagrama de fases del sulfato sódico.

Como se observa en esta figura, uno de los parámetros clave en la cristalización de tenardita o mirabilita es la temperatura. Otro factor determinante es, sin duda, es la humedad relativa (HR). En ambientes con humedad relativa inferior a 50% se forma fundamentalmente la fase anhidra (tenardita), mientras que la mirabilita decahidratada es más abundante en muestras donde la cristalización ha tenido lugar en condiciones de humedad relativa superior a 50%.

Rodríguez-Navarro et al. (2000) estudiaron la cristalización de fases del sistema de sulfato sódico y agua a temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C}$ ) y diferentes humedades relativas: 12%, 30%, 40%, 50% y 60%. Las fases precipitadas fueron analizadas mediante difracción de rayos-X en una cámara con control de humedad relativa y temperatura. Estos

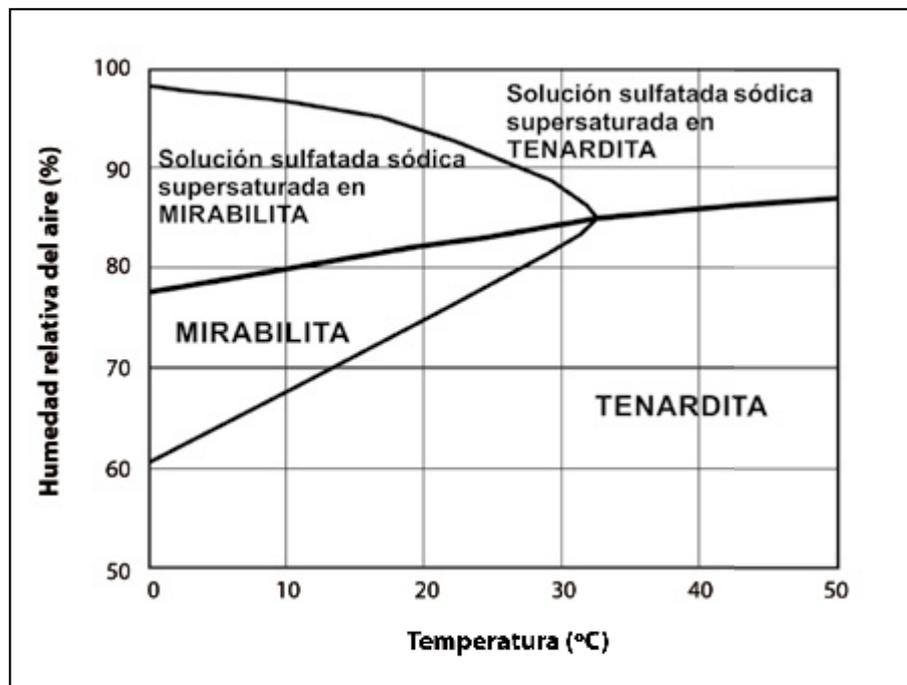


Figura 9. Diagrama de fases del sulfato sódico (Rodríguez Ortiz, 2011).

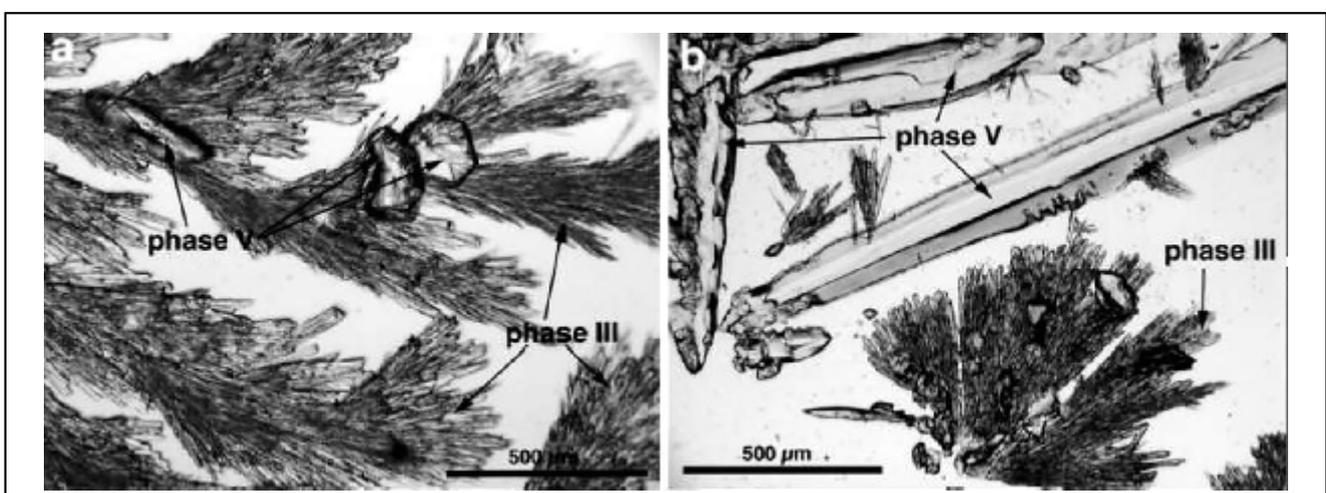


Figura 10. Micrografías de cristales de tenardita: a) precipitado a  $20^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} < 40\%$ . Abundancia de fase III con menos presencia de fase V (tenardita). b) Precipitado a  $20^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} = 13\%$ . Predominancia de la fase V (tenardita) sobre la fase III (Rodríguez-Navarro et al., 2000).

autores describen en sus resultados que, en condiciones de humedad relativa superior a 40%, el depósito de unas gotas de solución saturada de sulfato sódico generaba en primer lugar cristales prismáticos y elongados de mirabilita que inmediatamente se deshidrataban y transformaban en tenardita. Cuando la humedad relativa se encontraba por debajo de 40%, los cristales de sulfato anhidro precipitaban directamente de la solución saturada. En este estudio fue posible distinguir dos polimorfos de sulfato sódico: cristales aciculares de fase III agrupados formando dendritas y cristales más masivos, bipiramidales, de fase V o tenardita (figura 10a). Si la humedad relativa era muy baja (por debajo de 15%), los cristales precipitados eran fundamentalmente prismas de tenardita, con pequeñas cantidades de agregados aciculares de la fase III y una ausencia total de mirabilita (figura 10b).

Cardell et al. (2007) deducen en su trabajo que la deshidratación de la mirabilita para transformarse en tenardita no es una reacción isotérmica, sino que tiene lugar a lo largo de un rango de temperaturas a una velocidad dependiente de las condiciones del entorno como temperatura, humedad relativa, etc. En su estudio, este autor describe que la transformación de mirabilita a tenardita comienza a los 27°C y continua hasta los 33°C. En todo este rango de temperaturas ambos minerales coexisten, mientras que por encima de los 33°C el único mineral presente es la tenardita. Esta transformación por deshidratación implica una pérdida de cristalinidad, detectable mediante Difracción de Rayos-X por un aumento del ancho de los picos y del ruido de fondo del difractograma.

Zauggari et al. (1995) estudian en su trabajo la influencia de las variaciones térmicas en el inestable equilibrio que gobierna la presencia de la mirabilita en los depósitos salinos de las lagunas de Los Monegros. Así, proponen en su trabajo que las variaciones de temperatura controlan la presencia o ausencia de este mineral en los sedimentos estudiados. Durante el verano se produce la precipitación sucesiva de carbonatos → yeso → halita, mientras que en invierno la secuencia es carbonatos → yeso → mirabilita. De igual manera, las variaciones térmicas producidas a lo largo del día provocan a su vez una alternancia en la precipitación de mirabilita durante las bajas temperaturas nocturnas, seguido de una disolución al ascender la temperatura durante el día.

#### 4.5. Efectos destructivos de los sulfatos sódicos

Rodríguez Ortiz (2011) describe en su trabajo diversas experiencias de túneles construidos en este tipo de unidades geológicas, donde se han manifestado importantes hinchamientos por la transformación de tenardita a mirabilita, debido a la penetración de agua de deshielo. Por otro lado, el aumento de la temperatura favorece la transformación de la mirabilita en tenardita + agua. Esta liberación de agua puede confundirse con infiltraciones de agua desde el terreno. La figura 11 resume las potenciales transformaciones minerales dañinas que pueden producirse en túneles que atraviesan macizos salinos, en función de la presencia de agua, la presión y la temperatura existente.

Tanto la anhidrita como la tenardita son potencialmente peligrosas debido a su reactividad en presencia de agua,

asociada a cambios de volumen o desarrollando fuertes presiones de hinchamiento si el terreno está confinado:

Transformación	Hinchamiento libre	Presión de hinchamiento
Anhidrita $\text{SO}_4\text{Ca} \rightarrow \text{YESO } \text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	62%	3 – 6 MPa
Tenardita $\rightarrow$ Mirabilita ( $\text{SO}_4\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	318%	Hasta 9 MPa

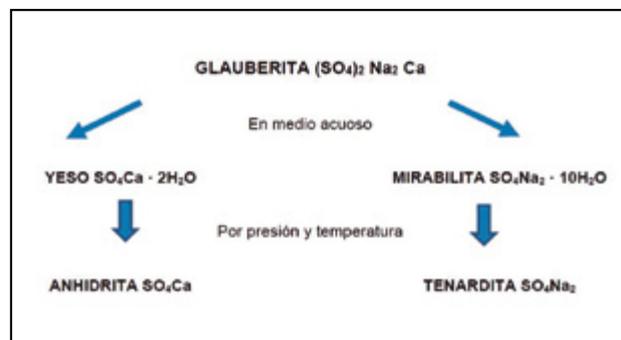
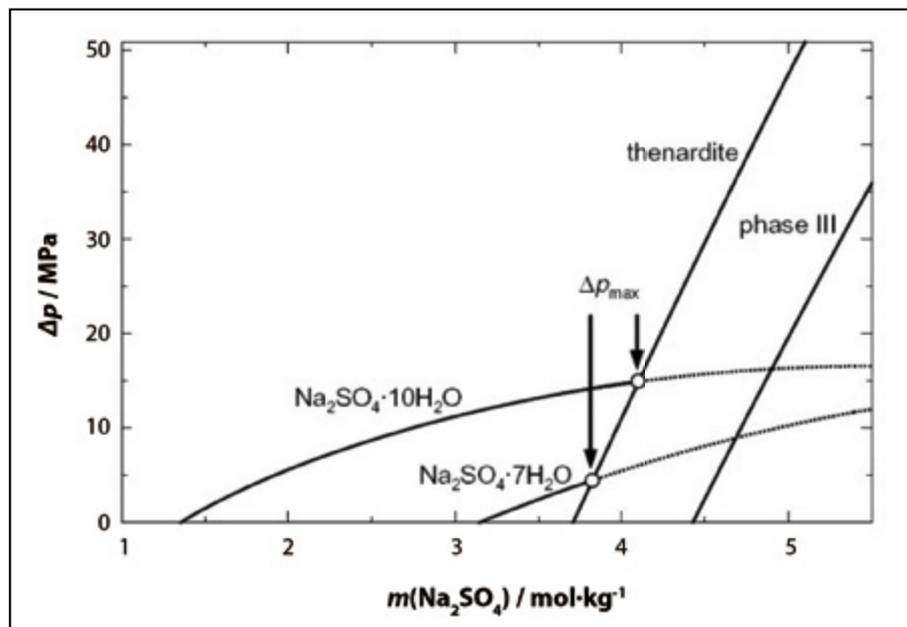


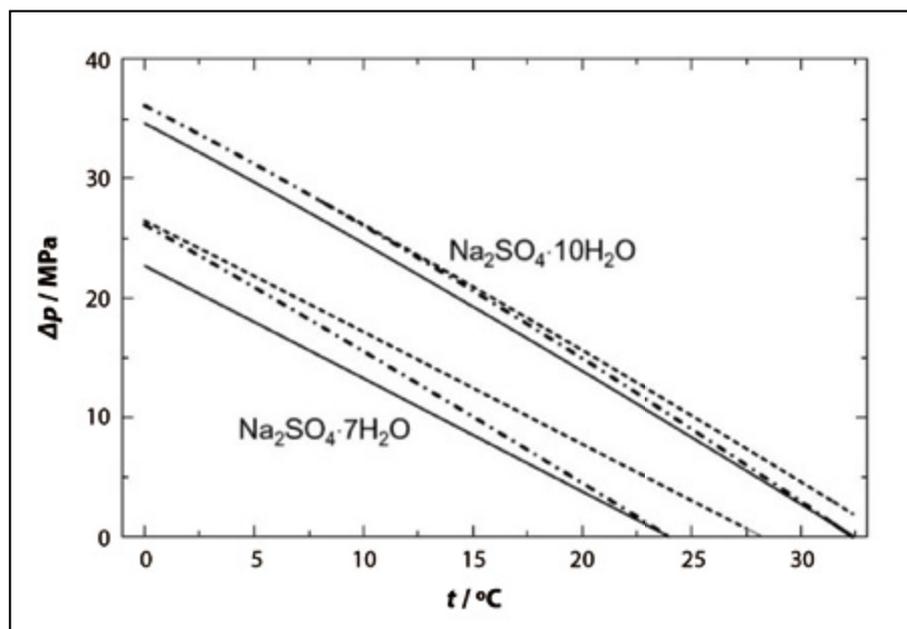
Figura 11. Transformaciones minerales dañinas descritas por Rodríguez Ortiz (2011) en túneles en unidades salinas.

Tradicionalmente se ha considerado que el efecto nocivo de estos minerales era debido al aumento de volumen asociado a reacciones de hidratación de la fase anhidra conocida como tenardita (Evans, 1970; Winkler y Wilhelm, 1970; Winkler y Singer, 1972; Goudie, 1977). Sin embargo, en los últimos años ha venido surgiendo y tomando fuerza una segunda teoría según la cual el efecto destructivo de estos sulfatos es debido a la nucleación y crecimiento de cristales de mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) a partir de soluciones supersaturadas generadas de la disolución de cristales de tenardita, la fase anhidra ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) (Sperling & Cooke, 1985; Fahey, 1986; Chatterji and Jensen, 1989; Flatt, 2002). Estudios experimentales realizados en el campo de alteración de rocas debido al crecimiento de cristales de sales en el interior de los poros (Flatt, 2002; Steiger, 2005; Steiger & Asmussen, 2008) apoyan la idea de que cuanto mayor es el grado de supersaturación del agua de los poros y mayor es la velocidad de evaporación, mayor es el daño en la roca ocasionado por cristalización de sulfatos.

Un hito en la historia de los conocimientos y teorías sobre la dinámica en el sistema sulfato sódico-agua es el momento en el que comienza a considerarse la posibilidad de que la tenardita en contacto con agua no se hidrata expandiendo, sino que se disuelve generando una disolución saturada en sulfato sódico que posteriormente va a precipitar en una u otra fase cristalina en función de condiciones como temperatura, humedad relativa, velocidad de evaporación, etc. En este sentido, cabe destacar el trabajo de Rodríguez-Navarro et al. (2000) por su claridad de exposición, la contundencia de sus resultados experimentales y la coherencia de sus conclusiones. Según sus propias conclusiones, muchos de los efectos que tradicionalmente se han atribuido a una presión de expansión, son debidos realmente a una presión de cristalización de la mirabilita o incluso de tenardita. Espinosa et al. (2008a, 2008b) apoyan esta teoría, defendiendo que la presión debida al crecimiento de los cristales es la principal razón de fracturación



**Figura 12.** Variación de la presión de cristalización de diferentes fases cristalinas de sulfato sódico en función de la molalidad de la solución salina. Los puntos indican la máxima presión de cristalización de las fases decahidratada (mirabilita) y heptahidratada (Steiger y Asmussen, 2008).



**Figura 13.** Variación de la presión de cristalización del sulfato de sodio decahidratado (mirabilita) y heptahidratado en función de la temperatura (Steiger y Asmussen, 2008).

de rocas sometidas al ataque de los sulfatos. En la figura 12 se encuentran representadas las presiones de cristalización generadas por las diferentes fases cristalinas del sistema de sulfatos sódicos en función de la concentración de la solución a partir de la cual precipitan a  $20^{\circ}\text{C}$ . Este diagrama propuesto por Steiger y Asmussen en 2008 ha sido determinado teóricamente. En la práctica, Rodríguez-Navarro y Doehne (1999), demostraron que en condiciones de humedad relativa superior al 40%, los cristales de sulfato sódico anhidro se formaban únicamente a partir de la deshidratación de cristales de mirabilita. En tales condiciones, la presión de cristalización difícilmente superará 13,9 MPa a  $20^{\circ}\text{C}$  (ver la intersección entre la curva de la mirabilita y la curva de la tenardita).

Desde entonces, diversos estudios (Sperling y Cooke, 1985; Rodríguez-Navarro y Doehne, 1999; Rodríguez-Navarro et al., 2000; Steiger y Asmussen, 2008) sugieren que el crecimiento de cristales tanto de las fases hidratada (mirabilita) como anhidra (tenardita) en el interior de los poros, genera una presión de cristalización que puede fracturar la roca (figura 13).

Estos mismos autores estudian la influencia de la velocidad de evaporación en la precipitación y presión de cristalización de fases cristalinas de sulfato sódico. Según su trabajo, la evaporación muy rápida de soluciones de sulfato sódico en condiciones de baja humedad relativa puede provocar altas supersaturaciones que provoquen presiones de cristalización muy elevadas, con presencia de la fase metaestable III.

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este estudio experimental y bibliográfico surge a raíz de la necesidad de comprender una serie de patologías observadas en un tramo de la LAV Madrid-Valencia a su paso por una unidad glauberítica perteneciente a la Unidad Salina del Mioceno de la Cuenca del Tajo. Se describe la aparición de un recubrimiento de varios centímetros de espesor de polvo blanco deleznable en un desmante adyacente a la obra. Los estudios de laboratorio han demostrado que se trata de un material producto de la alteración superficial de la roca glauberítica que compone el sustrato. Por su parte, se detectan grietas y levantamientos en la plataforma ferroviaria. Este estudio concluye que el agrietamiento del terreno se debe fundamentalmente a las presiones de cristalización de las fases de sulfato sódico, en forma de mirabilita o tenardita.

El agente geológico principal de los aspectos descritos es la presencia en el terreno de un alto porcentaje de glauberita, y todos los mecanismos de transformación mineral que se desatan al cambiar las condiciones ambientales del terreno con la excavación. Este aspecto no se consideró con la suficiente profundidad durante la fase de proyecto, ni durante la ejecución de las obras ya que estas se realizaron en época del año con temperaturas más altas y poca pluviometría.

La glauberita es un sulfato sódico-cálcico depositado en ambientes lacustres de elevada salinidad, e inestable en presencia de flujos de agua, que la transforman inmediatamente en yeso secundario mediante un fenómeno de disolución incongruente que libera agua supersaturada en sulfato sódico. Si este material se ve expuesto a exposición atmosférica que permita la evaporación del agua supersaturada, se producirá la precipitación de sulfato sódico en cualquiera de sus fases cristalinas: tenardita, sulfato sódico anhidro (III) o mirabilita. Estas dos últimas fases cristalinas son inestables una vez más en condiciones atmosféricas normales en la Cuenca del Tajo, con humedades relativas inferiores a 70%, lo que provoca su inmediata transformación en tenardita.

El resultado final de los procesos anteriormente indicados es que el sustrato, en un principio sano e inalterado, sometido a las condiciones naturales como consecuencia de la obra realizada, provoca la inmediata transformación de glauberita en yeso secundario y una cubierta pulverulenta y deleznable de polvo de tenardita en superficie, que resulta fácilmente erosionable.

En el interior del sustrato, la presencia de flujos de agua, introducidos fundamentalmente como consecuencia de las obras realizadas, provoca la disolución incongruente de la glauberita en yeso secundario y una solución supersaturada de sulfato sódico que, al precipitar, provoca una presión de cristalización dañina para la estructura instalada en su superficie.

Teniendo en cuenta que los problemas aparecidos son debidos a la exposición del sustrato salino a los agentes atmosféricos, las medidas de reparación deberían tener en cuenta siempre garantizar la impermeabilidad del sustrato ya que cualquier junta o defecto de hormigonado o las fisuras asociadas a deformaciones diferenciales pueden hacer que pase agua fresca al terreno con lo que se iniciaría un proceso irreversible de disolución que puede acabar con un fallo estructural.

## 6. AGRADECIMIENTOS

La autora desea expresar su agradecimiento a José Luis García de la Oliva, a Jesús Manzanas López y a Manuel Raya, por su apoyo durante las fases de estudio bibliográfico y experimentación.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Amirthalingam, V., karkhanavala, M.D. y Rao, U.R.K. (1977). "Topotaxic phase change in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ " *Acta Cryst.*, Vol. A33, pp. 522-524.

Arnold, A. (1976). "Behaviour of some soluble salts in stone monuments" in: T.H. Skoulikidis (Ed.), 2<sup>nd</sup> International Symposium on the Deterioration of Building Stones, National Technical University, Athens, pp. 27-36.

Braitsch, O. (1971). "Salt deposits: Their origin and composition" Springer, New York.

Cardell, C., Sanchez-Navas, A., Olmo-Reyes, F.J. y Martín-Ramos, J.D. (2007). "Powder X-ray Thermo-diffraction Study of Mirabilite and epsomite dehydration. Effect of direct IR-irradiation on samples" *Anal. Chem.*, Vol. 79, pp. 4455-4462.

Chatterji, S. y Jensen, A.D. (1989). "Efflorescence and breakdown of building materials" *Nordic Concr. Res.*, Vol. 8, pp. 56-61.

Espinosa, R.M., Franke, L. y Deckelmann. (2008a). "Model for the mechanical stress due to salt crystallization in porous materials" *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 1350-1367.

Espinosa, R.M., Franke, L. y Deckelmann. (2008b). "Phase changes of salts in porous materials: Crystallization, hydration and deliquescence" *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 1758-1773.

Evans, I.S. (1970). "Salt crystallization and rock weathering. A review" *Rev. Geomorphol Dyn*, Vol. 19, pp. 153-177.

Eysel, W. (1973). "Crystal chemistry of the system  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{CrO}_4 - \text{Na}_2\text{CrO}_4$  and the glaserite phase" *Am. Mineral.* Vol. 58, pp. 736-747.

Fahey, B.D. (1986). "A comparative laboratory study of salt crystallization and salt hydration as potential weathering agents in deserts" *Geogr. Ann. Ser. A: Phys Geogr.*, Vol. 68, pp. 107-111.

Flatt, R.J. (2002). "Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated" *J. Cryst. Growth*, Vol. 242, pp. 435-454.

García del Cura, M.A., Ordoñez, S. y López Aguayo, F. (1979). "Estudio petrológico de la "Unidad Salina" de la Cuenca del Tajo" *Estudios Geológicos*, Vol. 35, pp. 325-339.

García del Cura, M.A., Ordoñez, S. y Calvo, J.P. (1986). "La Unidad Salina (Mioceno) en el área de Madrid. Características petrológicas y mineralógicas" *Boletín Sociedad Española de Mineralogía*, Vol. 9, pp. 329-338.

Goudie, A.S. (1977). "Sodium sulphate weathering and the disintegration of Mohenjo-Daro, Pakistan" *Earth Surf. Process.*, Vol. 2, pp. 75-86.

Klein, C. y Hurlbut, C.S. (1998). "Manual de mineralogía" Tomo II, 4<sup>a</sup> Edición, Editorial Reverté S.A., ISBN: 84-291-4607-5, 679 páginas.

Linke, W.F. (1958). "Solubilities, inorganic and metal organic compounds: A compilation of solubility Data from the Periodical Literature". Van Nostrand-Reinhold, Princteto.

Linnow, K.; Zeunert, A. y Steiger, M. (2006). "Investigation of sodium sulphate phase transitions in a porous materials using humidity and temperature controlled X-ray diffraction" *Anal. Chem.*, Vol. 78, pp. 4683-4689.

- Naruse, H., Tanaka, K., Morikawa, H., Marumo, F. (1987). "Structure of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (I) at 693K" Acta Crystallogr., Sect B 43, pp. 143-146.
- Ordóñez, S., López Aguayo, F. y García del Cura, A. (1977). "Contribución al conocimiento de la mineralogía del yacimiento de sales de Villarrubia de Santiago (Toledo)" Estudios Geológicos Vol. 33, pp. 161 - 171.
- Ordoñez, S., Calvo, J.P., García del Cura, M.A., Alonso Zarrá, A.M. y Hoyos, M. (1991). "Sedimentology of sodium sulphate and special caliz from the Tertiary Madrid Basin (Spain)". En Lacustrine Facies Analysis (Anadón, P., Cabrera, L. y Kelts, K. Eds.), Spec. Publ. Intern. Assoc. Sediment., Vol. 13, pp. 37-53.
- Ordóñez, S. y García del Cura, M.A. (1992). "El sulfato sódico natural en España: las sales sódicas de la cuenca de Madrid" En: *Recursos minerales de España* (García Guinea, J. y Martínez Frias, J., Eds.). C.S.I.C., Textos Universitarios, 15: 1229-1250.
- Ortí, F. (2000). "Unidades glauberíticas del terciario ibérico: nuevas aportaciones" Rev. Soc. Geol. España, Vol. 13 (2), pp. 227-249.
- Ortí, F., Pueyo, J.J. y San Miguel, A. (1979). "Petrogénesis del yacimiento de sales sódicas de Villarrubia de Santiago (Toledo) (Terciario continental de la cuenca del Tajo)" Boletín Geológico y Minero Vol. 90, pp. 19-45.
- Pettijohn F.J., P.E. Potter y R. Siever. (1973). "Sand and sandstone". Springer Verlag, Berlin.
- Rodríguez Navarro, C. y Doehne, E. (1999). "Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern" Herat Surf. Process. Landforms, Vol. 24, pp. 191-209.
- Rodríguez-Navarro, C., Doehne, E. y Sebastián, E. (2000). "How does sodium sulphate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials" Cement Concrete Res., Vol. 30, pp. 1527-1534
- Rodríguez Ortíz, J.M. (2011). "El tunel de Regajal (LAV Madrid-Valencia) en formaciones salinas miocenas de la Cuenca del Tajo". Jornada Técnica "Túneles en terrenos salinos y expansivos." UPC, Barcelona, 20 de enero de 2011.
- Sperling, C.H.B., Cooke, R.U. (1985). "Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environments" Earth Surf Processes Landforms, Vol. 10, pp. 541-555.
- Steiger, M. (2005). "Crystal growth in porous materials. I. The crystallization pressure of large crystals" J. Cryst. Growth, Vol. 282, pp. 455-469.
- Steiger, M. y Asmussen, S. (2008). "Crystallization of sodium sulphate phases in porous materials: The phase diagram  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  and the generation of stress" Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 72, pp. 4291-4306.
- Utrilla, R., Ortí, F., Pierre, C. y Pueyo, J.J. (1991). "Composición isotópica de las evaporitas terciarias continentales de la Cuenca del Ebro: relación con los ambientes deposicionales" Rev. Soc. Geol. España, Vol. 4, (3-4), pp. 353 - 360.
- Utrilla, R., Pierre, C., Ortí, F., y Pueyo, J.J. (1992). "Oxygen and sulphur isotope compositions as indicators of the origin of Mesozoic and Cenozoic evaporites from Spain". Chem. Geol. (Isotope Geosci. Sec.), Vol. 102, pp. 229-244.
- Winkler, E.M. y Wilhelm, E.J. (1970). "Salt burst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere" Geol. Soc. Am. Bull, Vol. 81, pp. 567-572.
- Winkler, E.M. y Singer, P.C. (1972). "Crystallization pressure of salt in stone and concrete" Geol. Soc. Am. Bull, Vol. 83, pp. 3509-3514.
- Zaouggari, H., López, P.L., Bourrié, G., Auqué, L.F. y Vallés, V. (1995). "Geoquímica de las lagunas saladas de los monearos (Zaragoza). 1. Determinación experimental de los efectos del re-equilibrio mirabilita-solución con la temperatura en un sistema natural" Estudios Geológicos, Vol. 51 (5-6), pp. 243-258.



## **Determinación del nivel de riesgo del sistema ferroviario español.**

Autores: Francisco Toledo Castillo, María Josefa Sospedra Baeza, Mari Carmen LLoret Catalá y Miguel Figueres Esteban

Serie Monografías: M-113

ISBN: 978-84-7790-536-3

Año: 2012

P.V.P.: 20 €

El presente manual es resultado del proyecto de investigación (PT-2007-035-8IAPM) "Determinación del nivel de riesgo aceptado en el funcionamiento del ferrocarril en España para los diferentes subsistemas existentes" (DETRA) subvencionado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex) dentro del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004- 2007, con el objetivo de proporcionar a la autoridad ferroviaria española información del nivel de riesgo en el ferrocarril español en base al estudio y análisis del histórico de los accidentes e incidentes ocurridos en los últimos años, siendo un referente en la gestión de riesgos desde el enfoque sistémico, tanto a nivel nacional como internacional. El manual se ha estructurado en cuatro grandes bloques. El primer bloque (capítulo 1) ofrece al lector una visión del marco normativo nacional y europeo en la gestión de la seguridad ferroviaria y describe el alcance del proyecto DETRA dentro de este marco. El segundo bloque (capítulo 2) expone la metodología más adecuada para la obtención del nivel de riesgo de un sistema ferroviario, ilustrándola con la experiencia obtenida de la aplicación de dicha metodología a través del proyecto DETRA en el ferrocarril español. En el tercer bloque (capítulo 3) se exponen los resultados de la aplicación de la metodología DETRA al sistema ferroviario español para el período temporal 2000-2008, obteniendo fundamentalmente el nivel de riesgo del sistema ferroviario español mediante los Indicadores de Valor de Referencia (IVR). Finalmente, el último bloque (capítulos 4 y 5) recoge las conclusiones y recomendaciones obtenidas en relación a: i) las tasas de nivel de riesgo; ii) el sistema ferroviario de fallos; iii) los principales colectivos de riesgo; iv) la asignación de los niveles de riesgo a los actores ferroviarios y las personas ajenas al ferrocarril y, v) indicadores de la Directiva de Seguridad Ferroviaria 2004/49/CE.