

INFLUENCIA DE LA RECRISTALIZACION DE SALES EN LOS PROCESOS DE METEORIZACION SUBAEREA EN EL VALLE DEL EBRO

Juan M. Tena*
Juan A. Mandado*
José A. García-Anquela*

RESUMEN

La gran abundancia de sales en todos los materiales del relleno terciario de la Cuenca del Ebro, unida a una climatología de tipo árido, condicionan la formación de costras y eflorescencias salinas. Ocasionalmente las costras pueden preservar el sustrato de la acción de los agentes de meteorización pero en general la cristalización externa de sales es causa de desagregación y descamación de las rocas que provoca una aceleración de la meteorización con desarrollo de formas erosivas específicas.

SUMMARY

The abundance of salts and climatological conditions in Ebro basin are the factors of saline efflorescences and crust formation. The rock is occasionally preserved by the crystallizations, but more usually they are an effective agent for superficial processes, with peculiar characteristics for erosion land-forms.

Las escasas e irregulares lluvias, las elevadas temperaturas estivales y la importante eólica en el Valle del Ebro, unido a la gran abundancia de materiales salinos que se encuentran dispersos, como material cementante o como formaciones diferenciadas, proporciona unas peculiaridades en cuanto a la solubilidad, disgregación y poca competencia frente a la erosión que son características.

* Departamento de Petrología. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza.

Un fenómeno específico, resultado de la concurrencia de los factores enumerados, es la formación de eflorescencias y costras salinas que son un factor acelerador o en casos muy restringidos, inhibidor, de los procesos de meteorización y erosión. Al estudio de esta influencia de las sales se ha dedicado este trabajo, que no es más que una aportación más al conocimiento que en relación con los aspectos geomorfológicos en el Valle del Ebro ha sido iniciado por otros muchos investigadores.

METEORIZACION Y EROSION COMO CONSECUENCIA DE LA CRISTALIZACION DE SALES

El efecto de disgregación de rocas producido por la cristalización de sales es conocido desde el siglo pasado y han sido numerosos los autores que han estudiado el proceso. La diversidad geográfica en que se presenta el fenómeno (desde las zonas polares al Ecuador) y la variedad de rocas a las que afecta (desde endógenas como los granitos a las estrictamente sedimentarias como las arenitas o las evaporitas), ha condicionado la formulación de diversas teorías en cuanto a su origen y a las causas que conducen a la destrucción progresiva de la roca huésped.

En relación con el origen de las sales se han citado dos fuentes principales, una "exógena" y otra "endógena". Como aportes exógenos se han propuesto la infiltración de aguas saturadas con sales lixiviadas de rocas supra o infrayacentes y los aportes eólicos por formación de aerosoles. En el caso de aportes endógenos se ha supuesto que podrían proceder de la alteración de los componentes más lábiles de la roca, de la disolución de sales que se encuentran previamente como un componente más de aquella, o de la reorganización estructural de filosilicatos.

En cuanto a las causas que conducen a una rápida meteorización se han planteado dos hipótesis fundamentales. Una de ellas considera que es debido a un proceso de tipo estrictamente químico, por la alteración de minerales poco resistentes; la otra supone que, además del proceso químico, se efectúa una acción física, de mayor importancia, originada por el fenómeno intrínseco de formación y crecimiento del cristal.

La acción física correspondiente a la última hipótesis se ha atribuido a la derivada del aumento producido al formarse el cristal y en relación con el volumen ocupado por la disolución, al efecto de incremento de volumen debido al paso de las formas anhidras o las hidratadas, o a la presión ejercida por el crecimiento cristalino (o presión de cristalización). Los efectos producidos por las diferencias de volumen sal/disolución serían de efecto análogo al producido por el paso agua/hielo de conocidas consecuencias, pero en la actualidad se atiende más, en el caso de la formación de sales a las otras dos posibilidades.

RECRISTALIZACION DE SALES

En general, y comenzando por el conocido paso de anhidrita a yeso, todos los procesos de hidratación dan lugar a un aumento de volumen, en ocasiones de tanta importancia como el del 315% correspondiente a la transformación thenardita — mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), o el de 223% para hexahydrata — epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Si el proceso de hidratación se produce en un volumen limitado (sistema de poros, por ejemplo), se generan presiones suficientes para fracturar cualquier tipo de roca.

La presión de cristalización o presión del cristal al crecer es un fenómeno que ha sido estudiado por numerosos autores. La formulación más general que proporciona el valor de esta presión es $P = \frac{RT}{VS} \ln C/C_s$, y aunque se han aportado correcciones a esta fórmula, las cifras evaluadas son lo suficientemente grandes como para superar las presiones que pueden soportar, sin fracturarse, la mayoría de las rocas. WINKLER (1975) proporciona, para una relación $C/C_s=50$ y una $T=50^\circ\text{C}$, valores tan elevados como son 3737 atmósferas para la halita, 2262 para la hexahydrata, 1965 para la thenardita, 1900 para el yeso, 800 para la hexahydrata, 708 para la epsomita, 473 para la mirabilita, etc.

El mecanismo por el que se produce la erosión de las rocas es la disgregación con liberación individual de granos, o la descamación con separación de láminas de roca. Ambos pueden ser resultado de la presión ejercida por la cristalización o hidratación-deshidratación de las sales, las cuales pueden localizarse tanto en la cara externa de la superficie de la roca (eflorescencias) como en la interna (subeflorescencias). En cualquiera de los dos casos la cristalización de la sal es resultado de la evaporación del agua que contiene los iones disueltos y ocupa los poros de la roca, y la velocidad del proceso depende de numerosos factores tales como humedad o sequedad ambiental, temperatura (que influye en la solubilidad de la sal), geoquímica de las aguas circulantes, relieve local, etc. Dos factores considerados tradicionalmente como muy influyentes con la acción eólica (entre otras causas porque provoca la renovación del aire saturado en contacto con la roca) y las condiciones microclimáticas que se alcanzan en las formas erosivas generadas.

Los granos desagregados a las costras descamadas son fácilmente eliminadas por la acción eólica, por las ocasionales aguas circulantes o simplemente por gravedad, dejando al descubierto una nueva superficie de roca.

EFLORESCENCIAS EN EL VALLE DEL EBRO Y FORMAS DE EROSION DERIVADAS

Los análisis químicos de eflorescencias y costras salinas desmuestreadas sobre todo tipo de rocas (conglomerados, arenitas, limolitas, lutitas, margas y yesos) han mostrado una composición constituida fundamentalmente por

sulfatos y cloruros, con Ca, Mg, Na y K como cationes fundamentales. Los carbonatos o bicarbonatos son inexistentes o sólo han sido detectados como trazas.

La metodología utilizada ha sido la clásica en este tipo de análisis, a partir de la fase extraída por disolución en agua bidestilada durante 24 horas a 30°C y con una proporción de 250 mgs. de muestra en 100 mls. de solución. El Ca^{++} y el Mg^{++} se han determinado por complexometría empleando ácido calconcarboxílico y negro de eriocromo T como indicadores; el Na y el K se valoraron mediante fotometría de llama; los cloruros mediante el método de Mohr-Winkler; el SO_4 por complexometría de valoración indirecta; CO_3 y COH^- por alcalimetría.

No se ha efectuado identificación mineralógica de componentes por difracción de rayos X y la observación de cristales con la lupa binocular sólo ha permitido identificar yeso y halita.

En todas las muestras analizadas se encuentra sulfato, en tanto que de carbonatos solamente se han identificado trazas en algunas de ellas y aún en éstas es presumible que procedan de la contaminación por material de la roca huésped en la operación de desmuestre. Los cloruros existen en proporciones muy variables, desde donde constituyen la práctica totalidad de la muestra (eflorescencias procedentes de Remolinos) o son muy abundantes (charcas y lagunas de Monegros y del Bajo Aragón), a las que tienen un contenido bajo (aunque muy significativo, como es el caso de muestras localizadas en algunos conglomerados de las terrazas del Ebro) o no existen (muestras sobre limolitas arenosas o lutitas). Los cationes en mayor cantidad, salvo en el caso de las muestras de Remolinos, son Ca^{++} y Mg^{++} en proporciones variables, normalmente más abundante el primero; como hecho sobresaliente hay que señalar que el Mg^{++} predomina sobre el Ca^{++} prácticamente en todas las eflorescencias generadas sobre los taludes de las formaciones yesíferas. El Na^+ siempre escaso, salvo en las muestras procedentes de Remolinos donde es el catión fundamental, es normalmente más abundante que el K^+ excepto en el caso de eflorescencias localizadas en formas erosivas sobre barras arenosas, hecho que se atribuye a los aportes procedentes de la meteorización del feldespato potásico constituyente de la roca que se han identificado en observación microscópica de láminas delgadas.

Hemos observado que el proceso de cristalización superficial de sales puede dar lugar a dos efectos diametralmente opuestos, tal cuales son la preservación del sustrato de la erosión y la destrucción del mismo.

El efecto de preservación y protección del sustrato se produce por una cementación en superficie de los granos constituyentes de la roca que impide la penetración de las aguas e inhibe la acción destructora de las aguas circulantes o la deflacción eólica. Sus efectos son de escasa trascendencia en cuanto que normalmente las costras terminan por desaparecer por disolución o por un proceso de descamación. Se forman preferentemente sobre

RECRISTALIZACION DE SALES

superficies de materiales poco permeables y de grano fino (lutitas, margas o calizas), y son más frecuentes en superficies horizontales o de escasa pendiente.

En algunos casos la preservación es de muy escasa duración, pues los procesos de hidratación-deshidratación con el consiguiente aumento de volumen da lugar a la formación de los "teepees" o abombamientos (en el caso de que las eflorescencias se formen sobre arcillas expansivas hay un efecto sinérgico dando lugar a verdaderos *gilgais*); la ruptura de estos abombamientos por causas naturales o por la acción biológica (paso de ganado, p.e.) destruye la costra dejando al descubierto un sustrato pulverulento fácilmente erosionable.

El efecto más sobresaliente de las eflorescencias salinas es, con mucho, el de coadyuvar a los procesos de meteorización y erosión, y a ellos hemos prestado una mayor atención. Como primera observación hay que señalar que la importancia de su acción y las formas erosivas a que dan lugar, es función, fundamentalmente, de las características composicionales, estructurales y sobre todo texturales de la roca sobre la que se asientan.

En nuestra opinión, el origen de los iones que se encuentran en las eflorescencias del Valle del Ebro es endógeno, a partir de disolución de sales previas en la mayoría de los casos, de alteración de feldespatos o máficos, y de reorganización de filosilicatos. Sólo muy ocasionalmente hay aportes exógenos, por efectos de capilaridad a partir de los suelos desarrollados a pie de los taludes y con mucha menor importancia, por aportes eólicos.

Se ha citado reiteradamente la acción eólica como agente fundamental en la formación de eflorescencias y en la progresión de la erosión, pero según nuestras observaciones su papel es secundario, tal como parece demostrar el hecho de que la intensidad de la erosión es aparentemente aleatoria, sin que se establezcan prioridades en función de la orientación a favor de direcciones de los vientos dominantes. Su importancia radica, casi exclusivamente, en ser el agente eliminador de las partículas disgregadas o en favorecer una rápida evaporación del agua de las salmueras.

De mayor importancia parece ser la exposición al Sol, pues se ha observado que las mayores y más abundantes eflorescencias así como las más importantes formas erosivas, tienen orientación a solana aún cuando ésta se encuentra a resguardo del viento. Este efecto está originado, posiblemente, por una mayor capacidad de disolución de sales al elevarse la temperatura (con un más elevado aporte iónico) y a la rapidez de la precipitación por una súbita evaporación que provoca también una mayor capacidad de bombeo capilar.

Las eflorescencias con predominio de sales haloideas, esencialmente halita, son características de las zonas próximas a Remolinos, donde aparecen en los taludes como grandes áreas que permanecen más húmedas que

el resto de la superficie o como eflorescencias a veces de espesor considerable. En líneas generales no se aprecia que proporcionen algún tipo específico de formas erosivas, aún cuando la lixiviación de la sal constitutiva de las formaciones sea la causa de desplomes o hundimientos de los taludes por descalces.

En las formaciones yesíferas del Valle del Ebro, las eflorescencias se caracterizan normalmente por acumularse preferentemente en determinados estratos u horizontes, a favor de las superficies de contacto de las capas (en muchas ocasiones con intercalación de lutitas y margas entre los yesos en fracturas, o delimitando nódulos o porciones más compactas de la roca. Esto parece indicar la existencia de un control función de la presencia de zonas más permeables. La elevada proporción de Mg^{++} que se ha determinado en estas eflorescencias, procede según nuestro estado de conocimiento actual, del que se encuentra adsorbido o absorbido en los minerales de la arcilla.

También en las formaciones pelíticas (limolitas, lutitas y margas) hemos observado una acumulación de eflorescencias de forma preferente en determinadas zonas. El carácter de las acumulaciones nos induce a pensar que su formación está condicionada por las propiedades texturales de la roca y fundamentalmente relacionadas con la permeabilidad. El crecimiento de los cristales neoformados conduce a la formación de un residuo pulverulento, fácilmente eliminable por deflación eólica el escurrimiento de las aguas de lluvia, y se forman así pequeños alvéolos, normalmente alineados según el estrato más permeable, que evolucionan a grandes tamaños y que son causa de desplomes por gravedad.

Uno de los ejemplos más sobresalientes del efecto de la formación de eflorescencias y costras salinas sobre los procesos erosivos es el que se encuentra en las arenitas y limolitas arenosas que constituyen la base de muchos estratos conglomeráticos, y que dan lugar a la formación de abrigos y al desprendimiento de grandes masas rocosas conglomeráticas que quedan irregularmente distribuidas por las laderas. De acuerdo con nuestras observaciones, el proceso está condicionado por la percolación del agua de lluvia por el sistema de poros, fisuras o diaclasas de los conglomerados, cargándose de iones en disolución; al aflorar estas aguas en los taludes se produce una rápida evaporación, cristalizando las sales como eflorescencias y subeflorescencias y provocando la desagregación o la descamación. La acción del viento, la erosión ocasional por aguas circulantes o la simple caída gravitacional, da lugar a la génesis de nichos cuyo anastomosamiento conduce a la formación de abrigos a veces con grandes voladizos.

Hemos observado que también se constituyen eflorescencias en los conglomerados superiores, pero que no proporcionan efectos erosivos sobresalientes. Como veremos posteriormente al hablar de las eflorescencias en estos materiales, ésta es una cuestión relacionada con el tamaño efectivo de los poros.

RECRISTALIZACION DE SALES

Los ejemplos de formación de particulares formas erosivas en rocas detríticas de grano medio (arenitas), esencialmente nichos ("tafoni") y piletas y pilancones ("gnammas") han sido ya descritas en el Valle del Ebro (GUTIERREZ e IBÁÑEZ, 1979; RODRIGUEZ y DENAVASCUES, 1982). Se desarrollan sobre rocas detríticas de grano medio y fino compuestas por calcita, cuervo, feldespatos subordinados y algunos opacos, con cemento calcáreo y en menor proporción yesífero.

La diferencia entre los tafoni y las gnammas es, en principio, posicional, pues en tanto que los primeros se desarrollan sobre paredes verticales o de pendientes fuertes, las segundas se generan en superficies horizontales o de escasa pendiente. Su origen es análogo en los comienzos, pero difieren en su proceso evolutivo.

Según nuestras observaciones, la formación de nichos o tafonis comienza por una descamación o desagregación puntual de la roca, precisamente en los puntos o zonas en que se encuentra una discontinuidad textural (tamaño de grano, megacristales neoformados) o estructural (contactos de capas, zonas de estratificación cruzadas, rizaduras, fisuraciones, etc.). El agua de lluvia infiltrada en las arenitas tiene su salida en los taludes por las zonas de mayor permeabilidad, lixiviando las sales solubles que son eliminadas por completo si el flujo de aguas es suficientemente grande, o cristalizando como eflorescencias o subeflorescencias si hay una rápida evaporación. Ambas circunstancias, la primera por eliminación del cemento que traba los granos y la segunda por desagregación debido a la presión de cristalización o a fenómenos de hidratación-deshidratación, conducen a una liberación de granos, que son eliminados aumentando el volumen del alvéolo inicial.

No hemos apreciado la preponderancia de tafonis en las zonas inferiores de los taludes que ha sido señalada por algunos autores, pero se ha comprobado que hay una mayor abundancia de nichos (y son de mayor tamaño) en las paredes de la roca orientadas hacia las solanas aunque se encuentren a resguardo de la acción eólica, en tanto que en las zonas de umbría, aún cuando están orientadas según las direcciones predominantes del viento, son de pequeño tamaño ("honey-combs" o paneles de abeja) y ocupan superficies mucho menores.

Las piletas o pilancones (*gnammas*) tienen, indudablemente, un origen semejante al de los tafonis, pero en su evolución es de importancia fundamental la acción eólica. La inicial disolución del cemento que traba los granos, la formación de una eflorescencia localizada en la superficie horizontal de la roca o incluso la actividad biológica, da lugar a la formación de una depresión; la acumulación del agua de lluvias posteriores acelera el proceso de meteorización y así se consigue una inicial profundización de la depresión, que adquiere una forma circular o elipsoidal en función de la textura o estructura de la roca. En nuestro caso hemos observado que en arenitas

en las que se han desarrollado megacrístales autigénicos de yeso, la erosión comienza por la disolución temprana de éstos, formándose pequeñas depresiones que con posterioridad son agrandadas en diámetro y profundidad o bien se producen descamaciones en superficies de hasta varios decímetros cuadrados de área. El problema fundamental que presenta la evolución de las piletas es, tal como señalan GUTIERREZ e IBÁÑEZ (1979), la evacuación de los residuos detríticos cuando aquéllas han alcanzado ya una cierta profundidad. De las dos hipótesis planteadas por dichos autores, el rebosamiento del agua de llenado por las lluvias y la acción del viento, en nuestra opinión es más importante la última; los granos sueltos acumulados en el fondo son removidos por el movimiento turbillonario del viento inducido por la forma de la gnamma, que puede llegar a alcanzar suficiente energía cinética como para eliminar del interior todos los residuos.

Las formaciones detríticas gruesas del Valle del Ebro, también muestran frecuentemente grandes superficies con eflorescencias. Nosotros las hemos observado en los taludes de graveras con antigüedades inferiores a los diez años. Los cristales neoformados tienen una composición semejante a las generadas en otros tipos de sedimentos, pero normalmente su presencia no induce a una mayor velocidad en el proceso erosivo para el conjunto de la masa de la roca, aún cuando si que se aprecia una destrucción diferencial de los cantos constituyentes. La explicación de este fenómeno hay que achacarla al conocido efecto de que la haloclasticidad, al igual que la crioclasticidad, sólo es importante cuando el tamaño de poro se sitúa por debajo de un cierto tamaño crítico (menos de 5 μ para la acción del hielo como valor medio). Dado que los tamaños de los poros en los conglomerados suelen ser, en general, bastante grandes, de ahí que el efecto de la formación de eflorescencias y costras sea poco importante en relación con la fracturación, desagregación o descamación de estas rocas, en tanto que si que afecta a los componentes granudos.

CONCLUSIONES

Hemos comprobado que la neoformación de sales en la superficie de rocas de todo tipo en el Valle del Ebro constituyendo costras y eflorescencias, es un fenómeno que podría considerarse como normal y es consecuencia tanto de las condiciones climáticas como de la gran abundancia de sales distribuidas por todo tipo de materiales.

La composición de las eflorescencias responde fundamentalmente a sulfatos de calcio y magnesio en proporciones variables en función del tipo de sustrato en el que se forman. Existen también cloruros, fundamentalmente de sodio, aún cuando en algunas litologías puede haber predominio de potasio (fundamentalmente cuando se encuentran feldespatos entre las constituyentes de la roca) y sólo ocasionalmente y en escasas cantidades se encuentran carbonatos.

RECRISTALIZACION DE SALES

El origen de los iones formadores de las sales es la disolución de los constituyentes de la roca huésped o de otras interestratificadas con ella, siendo de escasa importancia, o en la mayoría de los casos nulos, los aportes de otro tipo.

La presión de cristalización de las sales o la producida por la hidratación-deshidratación de éstas, facilita la aceleración de los procesos erosivos al disgregar o descamar la roca huésped, dando lugar a formas erosivas que en ocasiones son características del material meteorizado. Solamente en casos aislados y en condiciones especiales, la formación de costras salinas superficiales da lugar a una preservación de la roca frente al proceso erosivo, salvaguarda que por regla general no es permanente y permite y aún finalmente también favorece el avance de la meteorización al cabo de poco tiempo.

El control de las neocristalizaciones está proporcionado por el tipo de roca que constituye el sustrato y se aprecia una relación directa con factores texturales y estructurales, estando reguladas fundamentalmente por la infiltración de aguas de lluvia y su evacuación, con intensa evaporación al alcanzar la superficie.



Foto 1.- Eflorescencias sobre lutitas con desarrollo de pequeños nichos. Se aprecia un control tanto estructural como textural, correspondiendo la situación de las eflorescencias a capas más permeables.

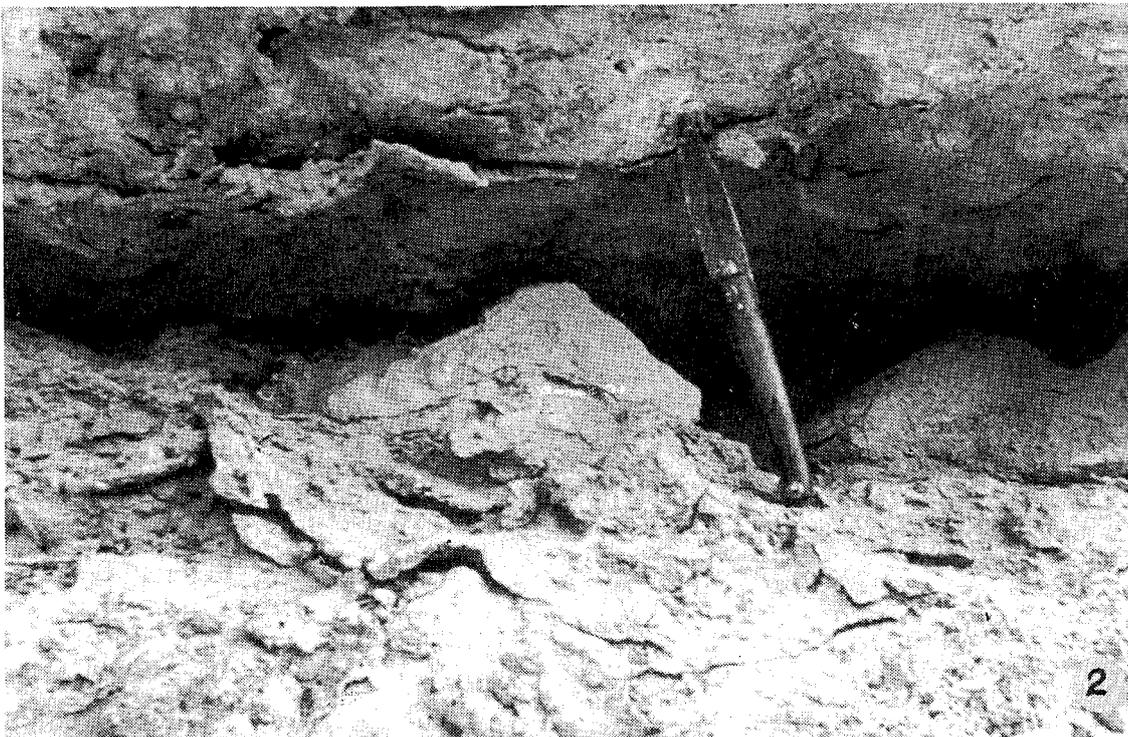


Foto 2.- Encostramientos y desprendimiento en escamas de arenita situada en la base de formaciones conglomeráticas.

RECRISTALIZACION DE SALES

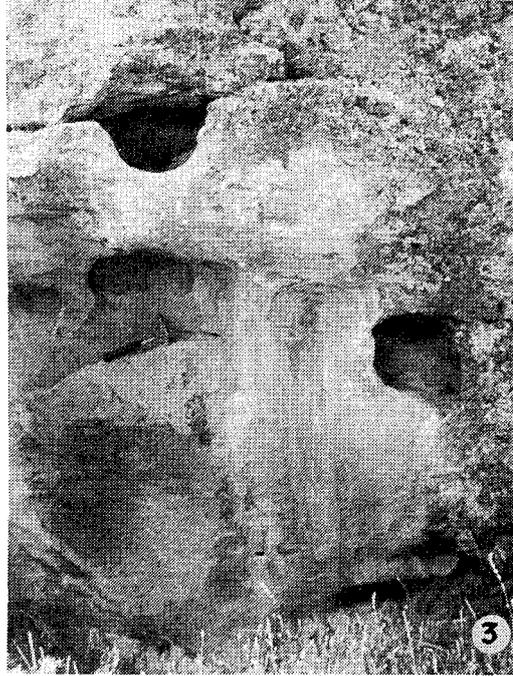


Foto 3.- Nichos ("tafoni") en la superficie vertical de arenitas. Existe un control estructural en el caso del más superior, situado en el contacto entre capas, y textural en el de los inferiores, localizados en las zonas de la roca con mayor permeabilidad.



Foto 4.- Eflorescencias en arenitas situadas en el fondo de un nicho. Se observa la disgregación de los granos constituyentes, cuya eliminación provoca el aumento de volumen del tafoni.

BIBLIOGRAFIA

- COOKE, R.U. (1981): Salt weathering in deserts. *Proc. Geol. Ass.*, 92, 1-16.
- CORRENS, C.W. (1949): Growth and dissolution of crystals under linear pressure. *Discussions of the Faraday Society*, 5, 267-271.
- EVANS, I.S. (1969, 1970): Salt crystallization and rock weathering: a review. *Rev. Geomorph. Dyn.*, 19 (4), 153-177.
- GOUDIE, A.S. (1974): Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical processes. *Z. Geomorph. Suppl. Bd.*, 21, 1-12.
- GUTIERREZ ELORZA, M. e IBAÑEZ, M.J. (1979): Las "gnammas" de la región de Alcañiz. *Est. Geol.*, 35, 193-198.
- MUSTOE, G.E. (1982): The origin of honeycomb weathering. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 93, 108-115.
- MUSTOE, G.E. (1983): Cavernous weathering in the Capitol Reef Desert, Utah. *Earth Surf. Proc. and Land.*, 8, 517-526.
- RODRIGUEZ VIDAL, J. y DENAVASCUES, L. (1982): La tafonización de las areniscas miocenas en los alrededores de Huesca. *Tecniterrae*, 49, 7-12.
- TWIDALE, C.R. & CORBIN, E.M. (1963): Gnammas. *Rev. Géomorph. Dyn.*, 14, 1-20.
- WATSON, A. (1983): Gypsum crust. In "*Chemical Sediments and Geomorphology*": A.S. Goudie & K. Pye (Eds.), Academic Press, 133-162.
- WELLMAN, H.W. & WILSON, A.T. (1963): Saltweathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments. *Nature*, 205, 1097-1098.
- WINKLER, E.M. & SINGER, P.C. (1972): Crystallization pressure of salts in stone and concrete. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83 (11), 3509-3514.
- WINKLER, E.M. (1975): *Stone: Properties, Durability in Man's Environment*. Springer Verlag, 230 pp.