

ANALISIS MORFOMETRICO DE LA TAFONIZACION DE LA ARENISCA DE PERALTILLA (ANTICLINAL DE BARBASTRO, DEPRESION DEL EBRO): INFLUENCIA DE LOS FACTORES MINERALOGICO-TEXTURALES

C. Sancho & M. Gutiérrez

Dpto. de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza.
50009 Zaragoza.

Resumen. Se ha efectuado un análisis morfométrico de la tafonización de las areniscas del anticlinal de Barbastro (Depresión del Ebro) utilizando técnicas estadísticas. Se han definido tres parámetros morfométricos (x: altura; y: anchura; z: profundidad) y se han realizado medidas en 100 tafonis repartidos en 10 estaciones. La clasificación mediante análisis cluster ha diferenciado cuatro clases morfológicas: tafonis de clase A ($x=y=z$); tafonis de clase B ($y>x=z$); tafonis de clase C ($y>x>z$); tafonis de clase D o gnamma en sillón ($y>x$; $z=0$). Cada una de estas clases morfológicas puede definirse por una relación paramétrica $x/y/z$, que depende de la porosidad, de la cantidad de feldespatos y de la presencia de sales en la arenisca, tal y como indica el modelo de regresión múltiple propuesto. Así, la aparición de unas formas u otras depende de factores texturales de la arenisca, que controlan la circulación de agua por el interior de la misma, y mineralógicos, que activan procesos de hidrólisis de feldespatos, humectación-secado y haloclastismo. Estos procesos tienen lugar bajo condiciones climáticas semiáridas.

Palabras clave: Tafoni, clasificación morfométrica, factores mineralógico-texturales, depresión del Ebro.

Abstract. Morphometric analysis of tafoni weathering in the Peraltilla sandstones of the Barbastro anticline (Ebro basin) using statistical methods have been carried out. Three morphometric variables have been defined (x: height, y: width and z: depth). We measured 100 tafoni from the study of 10 plots. Four tafoni morphologies have been distinguished means of clustering classification: type A ($x=y=z$), type B ($y>x=z$), type C ($y>x>z$) and type D or armchair shaped gnamma ($y>x$; $z=0$). Every morphological type can be defined using the relationship $x/y/z$ depending on voids index, feldspars and salts in the sandstones, just as is indicated by multiple regression model. In this way the tafoni shape depends on the textural factors controlling water circulation in sandstones, and the mineralogic ones which have a direct effect on feldspar hidrolisis, wetting-drying and salt-weathering processes, under semiarid climatic conditions.

Key words: Tafoni, morphometric classification, mineralogic-textural factors, Ebro basin.

1. Introducción

Por regla general, los procesos de tafonización se han analizado desde dos puntos de vista, haciendo referencia bien a la relación cualitativa existente entre las formas alterológicas y las posibles causas que las generan o bien a la comprobación experimental en el laboratorio de la funcionalidad de algunos procesos involucrados en la alteración de las rocas.

Si realizamos un breve repaso a la bibliografía existente sobre el tema se observa como se trata de un modelado azonal que tiene lugar en situaciones climáticas variables, aunque domina en contextos costeros y climas áridos y semiáridos, cálidos o fríos. Afecta a distintos tipos de litologías, habiéndose estudiado fundamentalmente en rocas graníticas, y su génesis se relaciona, principalmente, con diversos procesos de meteorización física y físico-química (Dragovich, 1969; Evans, 1969; Höllermann, 1975; Martini, 1978; Mustoe, 1983; Vidal-Romani, 1983).

Por otro lado, existen trabajos experimentales de laboratorio en los que se analiza la influencia de procesos tales como el haloclastismo, la humectación y secado o la crioclastia en la meteorización (Cooke, 1979; Williams & Robinson, 1981; McGreevy, 1982; Fahey, 1983; Sperling & Cooke, 1985) y, por consiguiente, tienen importancia en la génesis de los tafonis.

Recientemente han comenzado investigaciones que tienden a cuantificar la velocidad de la tafonización utilizando diversos métodos (Rögner, 1988).

Desde el punto de vista regional, destacan los trabajos de Rodríguez & Navascués (1982) y de Sancho & Benito (1990). El primero interrelaciona factores litológicos, climáticos y biológicos en la génesis y desarrollo de la tafonización sobre las areniscas miocenas de la parte centroseptentrional de la Depresión del Ebro. En el segundo se propone un modelo estadístico, basado en regresiones múltiples, en el que se observa como la intensidad de la tafonización viene controlada por la inclinación de las superficies, el inicio del proceso se relaciona con la existencia puntual de feldespatos y el desarrollo de las cavidades viene influenciado por fenómenos de haloclastismo y de humectación y secado.

Por otro lado, la influencia de la cristalización de sales en los procesos de meteorización en la Depresión del Ebro es analizada por Tena *et al.* (1984).

Sin embargo, son mucho más escasos los trabajos que tratan cuantitativamente aspectos morfológicos de la tafonización (Calkin & Cailleux, 1962) y resulta difícil encontrar una clasificación de estas formas en la bibliografía, con excepción de la de Twidale (1982) que diferencia, en material granítico y considerando una escala decimétrica-métrica, tres tipos de tafonis: "sheet tafoni", "boulder tafoni" y "side wall tafoni".

Por otro lado, a nivel de Depresión del Ebro, Gutiérrez & Ibáñez (1979) proponen una clasificación morfológica de las "gnammas" desarrolladas en calcarenitas y analizan la posible génesis de estas microformas.

Siguiendo criterios morfológicos similares a los anteriores es posible definir una serie de parámetros morfométricos de este micromodelado que permitan caracterizar estadísticamente las diferentes clases o tipos de tafonis establecidos. De esta manera, la propuesta de una clasificación morfológica y el análisis de los factores geométricos, mineralógicos y/o texturales que controlan las tipologías constituyen el objetivo de este trabajo.

2. El área de estudio

El área de estudio se localiza en el sector centro-septentrional de la Depresión del Ebro, próxima al contacto con las Sierras Exteriores Pirenaicas, constituyendo una banda situada entre los 400 y 500 m de altura, que se denomina Somontano de Barbastro. Aparece cortada transversalmente por los ríos Cinca y Noguera Ribagorzana (Fig. 1).

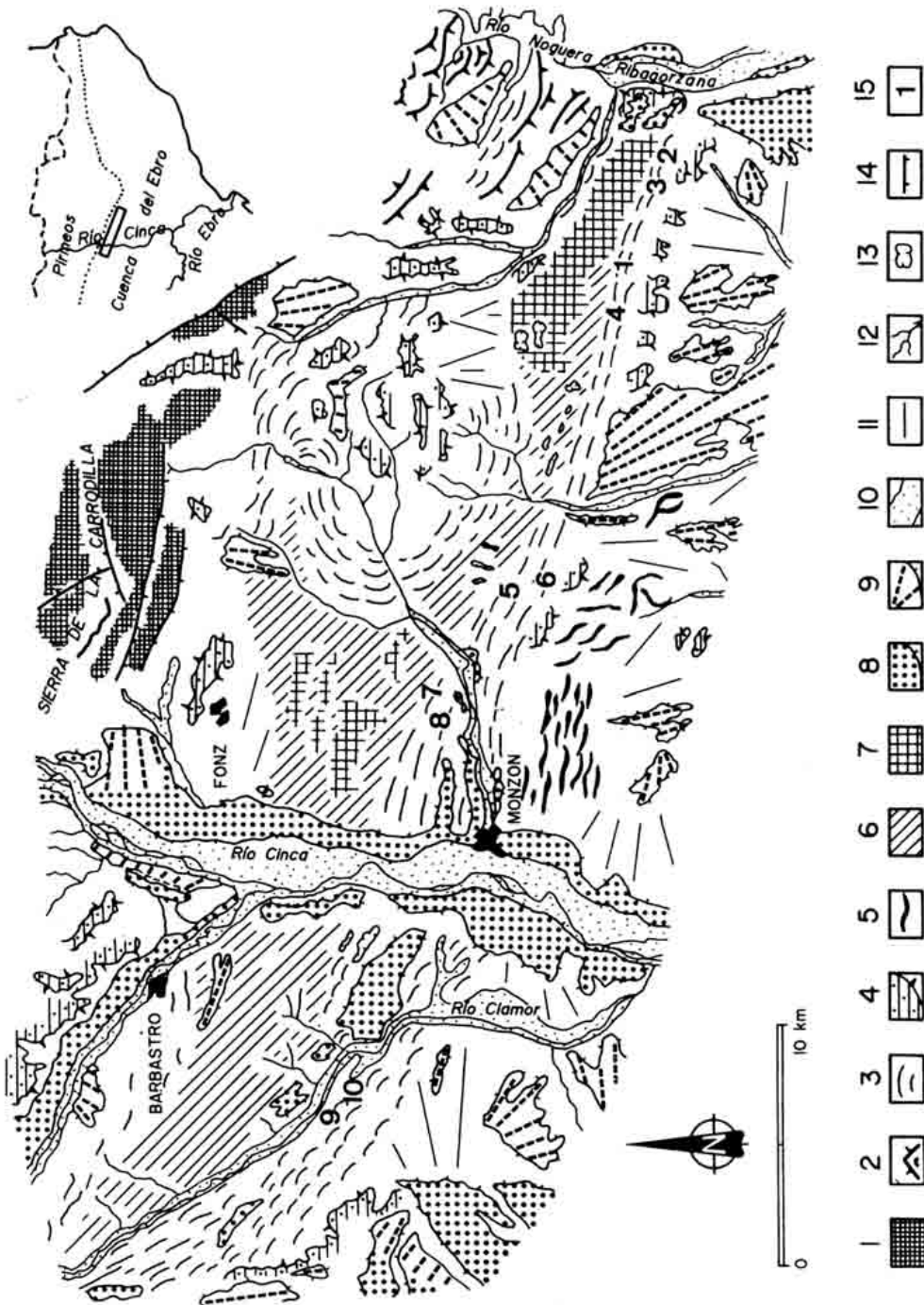


Fig. 1. Situación geográfica y marco geomorfológico del área de estudio y localización de las estaciones. 1: Superficies de erosión terciarias indiferenciadas. 2: Cuestas, hog-backs y chevrons en calizas del Mesozoico-Eoceno. 3: Cuestas y hog-backs en areniscas y conglomerados del Oligoceno. 4: Cuestas y mesas en areniscas y conglomerados del Mioceno. 5: Paleocanales. 6: Modelado en yesos. 7: Superficie de erosión del anticlinal de Barbastro. 8: Terrazas cuaternarias. 9: Glacis cuaternarios. 10: Llanura aluvial y valles de fondo plano. 11: Derrames o glacis recientes. 12: Red de incisión lineal. 13: Dolinas y depresiones cerradas. 14: Fallas con expresión morfológica. 15: Estaciones de medida.

Geographic and geomorphological setting of the study area and plots location. 1: Indifferentiated Tertiary erosion surfaces. 2: Cuestas, hog-backs and chevrons on Mesozoic-Eocene limestones. 3: Cuestas and hog-backs on Oligocene sandstones and conglomerates. 4: Cuestas and mesas on Miocene sandstones and conglomerates. 5: Paleochannels. 6: Gypsum landforms. 7: Barbastro anticline erosion surface. 8: Quaternary terraces. 9: Quaternary pediments. 10: Alluvial plain and infilled valleys. 11: Recent pediment. 12: Fluvial network. 13: Dolines and closed depressions. 14: Faults with morphological significance. 15: Plots.

Desde el punto de vista climático, este área presenta un régimen semiárido correspondiente a un clima de tipo mediterráneo con marcado carácter continental. La precipitación media anual es de 400 mm y la temperatura media anual es de 14 °C, existiendo fuertes contrastes estacionales.

La estructura geológica principal está constituida por un pliegue de dirección cercana a la E-W. Este accidente se genera durante el Oligoceno como resultado de diversas pulsaciones tectónicas pirenaicas. Litoestratigráficamente, en el núcleo del pliegue aparecen materiales evaporíticos del Eoceno (Fm. Yesos de Barbastro) y en los flancos sedimentos detríticos sintectónicos de abanicos aluviales del Oligoceno (Fm. Peraltila). Concretamente, el flanco meridional está compuesto por una serie monoclinal de areniscas intercaladas en un tramo esencialmente lutítico con buzamiento hacia el S-SW, que puede alcanzar los 1000 m de potencia. Estas areniscas aparecen modeladas en cuestas y hog-backs y sobre las superficies del reverso de las mismas se desarrolla una intensa tafonización que caracteriza geomorfológicamente a la Fm. Peraltila (Sancho, 1988) (Figs. 1 y 2)

Desde el punto de vista petrológico se trata de areniscas líticas de grano fino-medio, homométricas, con esqueleto constituido por cuarzo, fragmentos de roca lutítica, fragmentos de caliza, feldespato, calcedonia y mica y cemento de calcita en mosaico y esparítica.

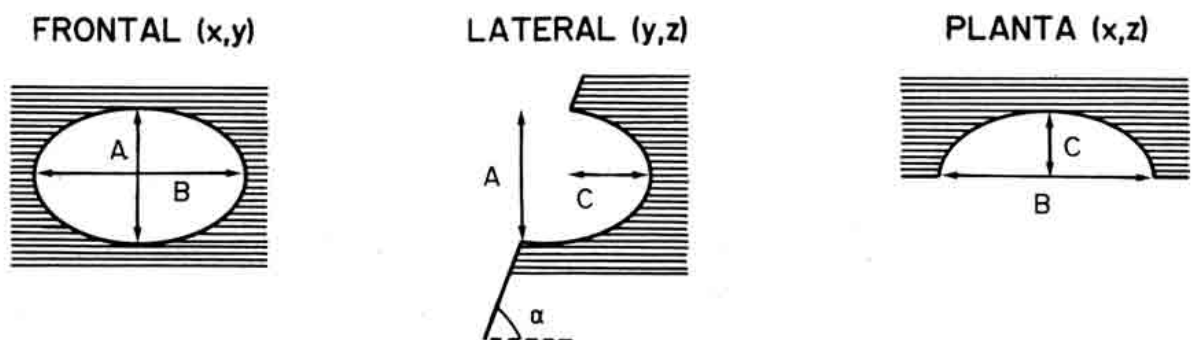
3. Metodología

La metodología utilizada para establecer una clasificación morfométrica de los tafonis y analizar los factores que controlan el desarrollo de estas formas está basada en métodos estadísticos. Las diferentes etapas del trabajo se pueden sintetizar del siguiente modo:

a) Elección de 10 estaciones de toma de medidas y muestras, repartidas a lo largo de una banda de 40 km de longitud que representan una superficie arbitraria incluida en un reverso de hog-back o cuesta (Fig. 2). En cada estación se han medido las dimensiones (x = altura, y = anchura y z = profundidad) de 10 tafonis representativos, siguiendo un sistema de referencia ortogonal (Fig. 2), teniendo en cuenta que los tafonis están individualizados y no existen coalescencias de los mismos. Por otro lado, se han determinado algunas características geométricas y mineralógico-texturales de cada estación que pueden estar relacionadas con el proceso de la tafonización. En las primeras se incluyen la inclinación de las superficies de exposición, la altura respecto al suelo y la orientación de los tafonis. En el segundo grupo las características determinadas incluyen el índice de vacíos siguiendo la norma del I.S.R.M. (1972), los porcentajes de filosicatos, calcita y feldespatos utilizando la difracción de rayos X y la conductividad eléctrica analizando la solución procedente del lavado de las sales de la arenisca. No se han estimado características climáticas y biológicas debido a la uniformidad existente entre todas las estaciones.

b) Como se trata de establecer una clasificación morfológica y no por tamaños, las medidas de los 100 tafonis se han expresado de modo porcentual, de tal manera que es posible la comparación entre grupos morfológicos. Para identificar las clases o tipos se ha realizado un análisis cluster. Posteriormente se han representado las 10 estaciones en un diagrama triangular que permite observar las características de cada clase.

c) Por último, de cara a determinar los factores que controlan el desarrollo de unas formas u otras se ha elaborado la matriz de correlación correspondiente y se han efectuado regresiones múltiples y múltiples escalonadas entre la relación paramétrica $x/y/z$, que define una morfología específica y que funciona como variable dependiente, y el conjunto de variables independientes definidas anteriormente.



A: ALTURA B: ANCHURA C: PROFUNDIDAD α : BUZAMIENTO

Fig. 2. Rasgos característicos de la tafonización de las areniscas del anticlinal de Barbastro, estaciones de medida nº 4 (Tamarite de Litera) y 8 (Almunia de San Juan) y esquema del sistema de referencia

Typical features of tafoni weathering in sandstones of Barbastro anticline, plots 4 (Tamarite de Litera) and 8 (Almunia de San Juan) and scheme of the reference frame

4. Resultados

Los resultados correspondientes al plan de trabajo anterior pueden separarse en dos partes según que hagan referencia a la clasificación morfológica de los tafonis o a los factores que controlan dicha clasificación.

4.1. Clasificación morfométrica de los tafonis

Para agrupar el total de los 100 tafonis en clases se ha utilizado un análisis cluster considerando las variables x , y , z anteriormente definidas. En la figura 3 se muestra el diagrama correspondiente. Para designar los diferentes tafonis se ha utilizado una simbología en la que el primer número (de 1 a 10) hace referencia a la estación y el segundo (de 1 a 10) a la microforma concreta. Del estudio del clustering se desprenden una serie de resultados. Básicamente se pueden diferenciar 6 grupos de tafonis a nivel del cuarto cluster. El grupo 1º está formado por tafonis de la estación 2 y el grupo 2º está compuesto por tafonis de las estaciones 2 y 4, existiendo entre ellos cierta relación. El grupo 3º incluye mayoritariamente los tafonis de las estaciones 6, 8 y 10 y se relaciona con el grupo 5º que incluye tafonis de las estaciones 6, 7, 8, 9 y 10. El grupo 4º está formado, predominantemente, por los tafonis de las estaciones 1, 3 y 5. Finalmente el grupo 6º está compuesto por un conjunto poco numeroso de morfologías de muchas estaciones y el tafoni 7.6 queda totalmente fuera de toda clasificación.

Del análisis efectuado hay que subrayar dos resultados concretos. Por un lado, se confirma la uniformidad de las morfologías por estaciones detectada inicialmente en los trabajos de campo ya que, en general y mayoritariamente, todos los tafonis de la misma estación se enmarcan en el mismo grupo con excepción de la estación 2. Por otro lado, el conjunto de las morfologías se pueden agrupar en cuatro grupos: tafonis de la estación 2, tafonis de las estaciones 2 y 4, tafonis de las estaciones 1, 3 y 5 y tafonis de las estaciones 6, 7, 8, 9 y 10.

Una vez agrupados los tafonis en clases morfológicas se pretende identificar las características paramétricas de estos tipos. Para ello se ha calculado el valor medio de los tres parámetros (anchura, altura y profundidad) para cada una de las estaciones y se han representado en un diagrama triangular. En la figura 4 se observa como las estaciones se agrupan de modo similar al indicado anteriormente. Por otro lado las características paramétricas de estos cuatro grupos son las siguientes (Fig. 5):

- Clase A. Está representado en la estación nº 2. Se trata de tafonis prácticamente equidimensionales, con valores similares de altura, anchura y profundidad ($x = y = z$). El tamaño máximo tiene dimensiones 58, 49 y 45 cm y el mínimo 3,3 y 3,5 cm respectivamente.

- Clase B. Aparece en la estación nº 4 y son tafonis aislados de gran desarrollo que se caracterizan por presentar altura y profundidad similares y algo menores que la anchura ($y > x = z$). El tamaño máximo llega a valores de 37, 150 y 50 cm. y el mínimo 3, 5 y 2 cm. respectivamente. Se trata por lo tanto de tafonis anchos y profundos.

- Clase C. Se desarrolla en las estaciones nº 1, 3 y 5. Las formas correspondientes a estas estaciones se presentan aisladas con un valor bajo de profundidad y dominio de la anchura con respecto a la altura. Son pues tafonis alargados poco profundos ($y > x > z$). Por lo que se refiere a la estación nº 1, las dimensiones máximas de los tafonis son 25, 64 y 8 cm y las mínimas 5, 7 y 5 cm. En la estación nº 3 los valores de altura, anchura y profundidad máximos son 25, 64 y 8 cm y los mínimos son 7, 3 y 2 cm. Finalmente en la estación nº 5 el tamaño máximo es 21, 38 y 3 cm y el mínimo corresponde a los valores 6, 6 y 1 cm respectivamente.

- Clase D. Se observa en las estaciones nº 6, 7, 8, 9 y 10. Las formas dominantes en estas estaciones se encuentran también aisladas y se pueden definir como tafonis con profundidad casi nula (como consecuencia del sistema de referencia ortogonal utilizado) y

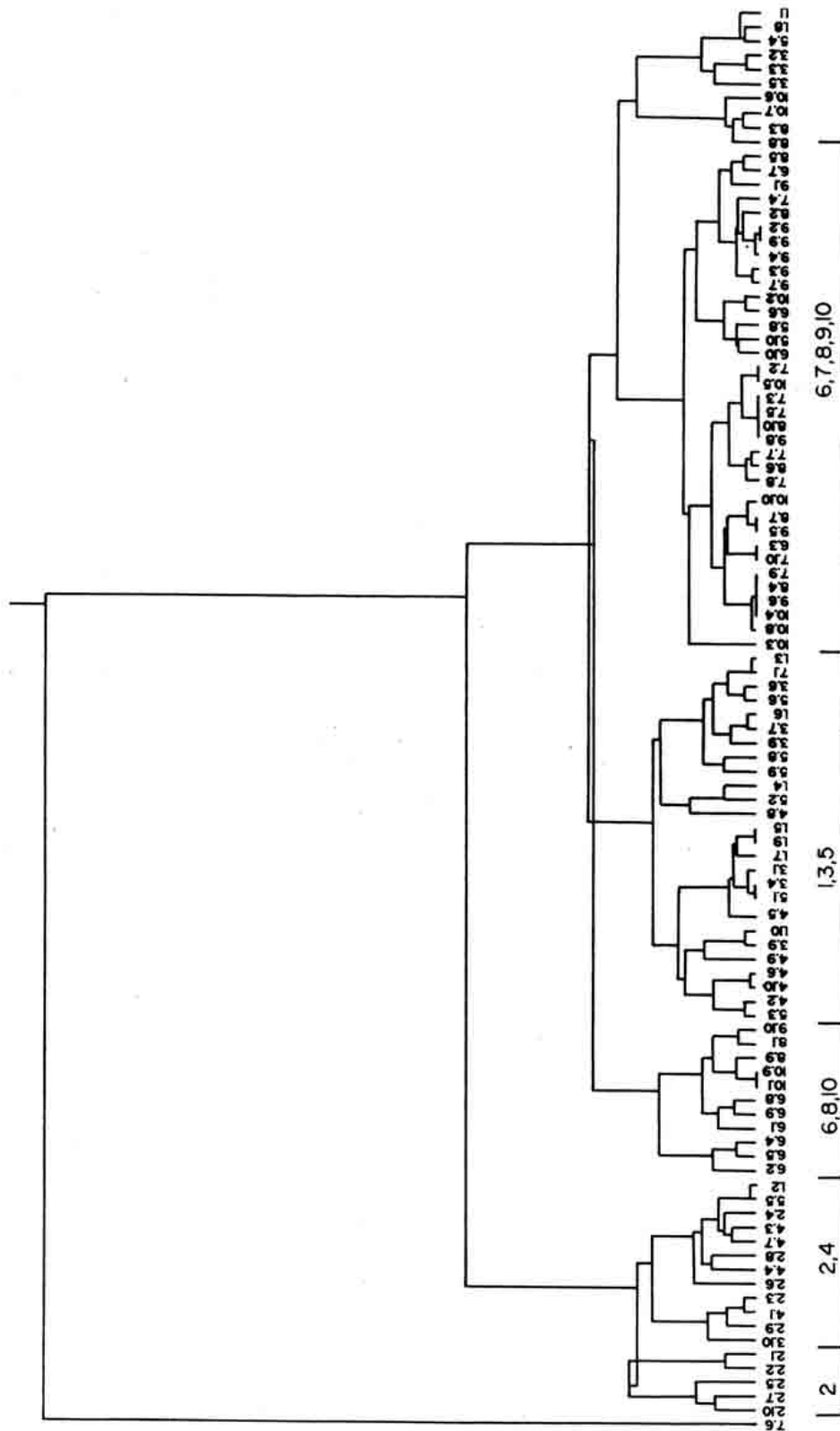


Fig. 3. Dendrograma cluster de los tafonis. El primer número hace referencia a la estación y el segundo al tafoni medido. Debajo se diferencian los principales grupos obtenidos con indicación de las estaciones de medida
Clustering diagram of tafoni measured. The first number is related to the plot and the second one to the tafoni. Below, the main cluster are differentiated indicating the plot number

un predominio de la anchura sobre la altura ($y > x$; $z = 0$). Estas morfologías son similares

a las gnammas en vertiente o en sillón (armchairs) (TWIDALE y CORBIN, 1963), aunque nosotros las hemos incluido dentro de la tafonización, por coexistir con las otras clases de tafonis diferenciadas. Se trata de oquedades con forma de sillón y sin cornisa superior o escasamente desarrollada. Por lo que se refiere a las dimensiones absolutas de estas morfologías, en la estación nº 6 los valores máximos son de 13, 38 y 2 cm y los mínimos de 2, 7 y 0 cm. Para la estación nº 7 son 13, 26 y 1 cm y 2, 4 y 0 cm respectivamente. En la estación nº 8 se han medido 35, 55 y 2 cm de tamaño máximo y 2, 5 y 0 cm de mínimo. Por lo que se refiere a la nº 9, los valores son 30, 40 y 0 cm y 6, 12 y 0 cm. Finalmente la estación nº 10 ofrece valores máximos de 30, 30 y 2 cm y mínimos de 3, 5 y 0 cm respectivamente.

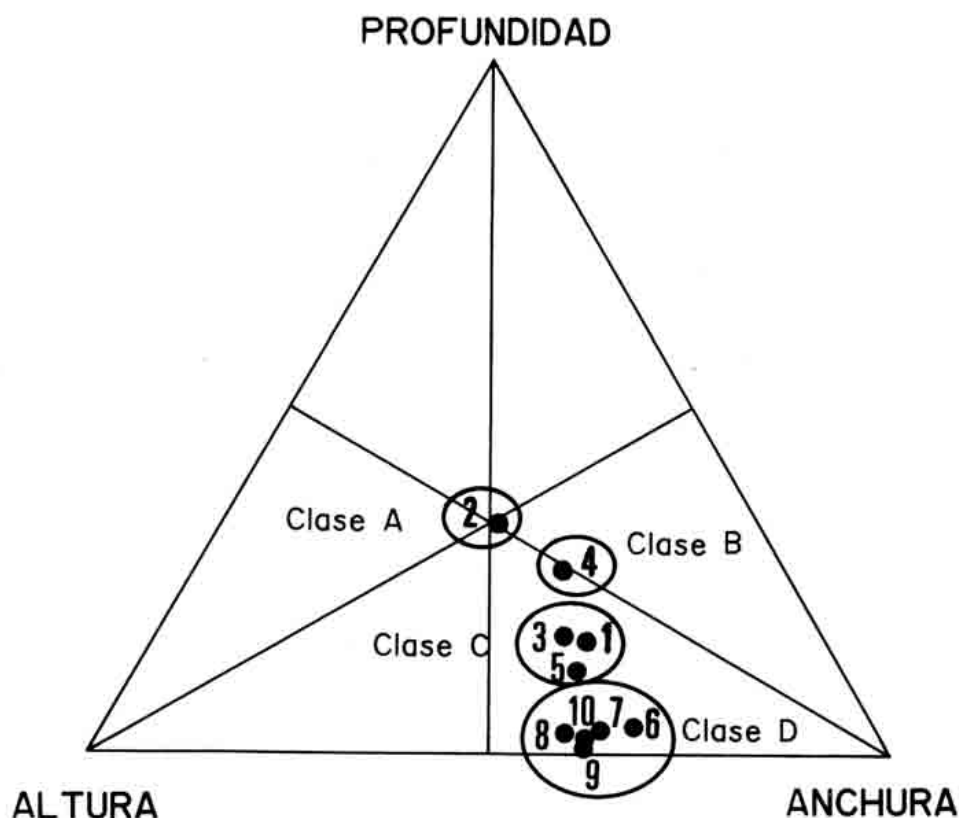


Fig. 4. Diagrama triangular que muestra las cuatro clases morfológicas de tafonis diferenciadas
Triangular diagram showing the four morphological tafoni types differentiated.

4.2. Controles de la morfometría de los tafonis

El desarrollo de morfologías de tafonis similares en cada estación indica la existencia de una serie de factores específicos de cada una que controlan la aparición de unas formas u

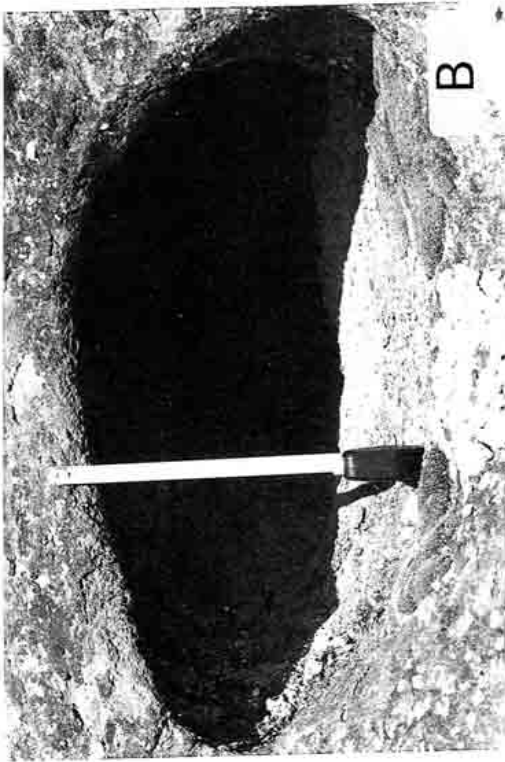


Fig..5. Tafonis de las clases A, B, C y D
Tafone types A, B, C and D

ESTACION	V. DEPENDIENTE	VARIABLES					INDEPENDIENTES				
		BUZAMIENTO	ALTURA AL SUELO m	ORIENTACION	INDICE DE VACIOS %	FILO- SILICATOS %	CALCITA %	FELDES- PATOS %	CONDUCTIV. ELECTRICA μS/cm 25°C		
1	0,11	55	8,0	210	8,6	29	23	7	182		
2	0,03	80	1,7	211	6,5	19	26	10	104		
3	0,09	64	1,5	211	8,2	30	20	12	159		
4	0,06	44	9,0	241	8,0	28	20	4	102		
5	0,14	40	2,1	213	6,9	20	30	7	110		
6	0,57	37	18,0	218	6,2	16	36	3	133		
7	0,61	40	6,5	233	8,1	20	29	3	88		
8	0,57	50	19,0	252	7,0	17	44	2	81		
9	1,99	45	2,5	229	10,6	24	28	3	84		
10	0,83	50	7,0	237	8,0	36	21	2	105		

Fig. 6. Valores de relación paramétrica $x/y/z$ y de las variables independientes
Parametric relationship $x/y/z$ and independent variables values

	X/Y/Z	BUZAMIENTO	ALTURA AL SUELO	ORIENTACION	INDICE DE VACIOS	FILO- SILICATOS	CALCITA	FELDES- PATOS	CONDUCTIV. ELECTRICA
X/Y/Z	1,00								
BUZAMIENTO	-0,35	1,00							
ALTURA AL SUELO	0,00	-0,41	1,00						
ORIENTACION	0,34	-0,38	0,52	1,00					
INDICE DE VACIOS	0,66	-0,12	-0,40	0,12	1,00				
FILO- SILICATOS	0,00	0,15	-0,38	0,00	0,49	1,00			
CALCITA	0,20	-0,31	0,69	0,35	-0,40	-0,81	1,00		
FELDES- PATOS	-0,57	0,72	-0,61	-0,77	-0,13	0,12	-0,44	1,00	
CONDUCTIV. ELECTRICA	-0,47	0,24	-0,90	-0,69	-0,03	0,36	-0,40	0,57	1,00

Fig. 7. Matriz de correlación entre variables
Matrix of the correlation between variables

otras. De cara a determinar estos factores se ha elaborado un modelo estadístico basado en regresiones múltiples y múltiples escalonadas. La variable dependiente elegida está representada por la relación paramétrica $x/y/z$ que define la morfología específica y propia de cada estación. Por otro lado, las variables independientes que deben explicar los valores de la relación anterior hacen referencia a características geométricas (inclinación de las superficies de exposición, altura respecto al suelo y orientación de los tafonis) y mineralógico-texturales (índice de vacíos, % filosicatos, % de calcita, % feldespatos y conductividad eléctrica) propias, también de cada estación. En la figura 6 se indican los valores de todas estas variables.

Como paso previo al análisis estadístico multidimensional se han codificado o estandarizado los valores anteriores, de cara a relacionar y comparar directamente las diversas variables. A continuación se ha construido la matriz de los coeficientes de correlación entre variables (Fig. 7). En ella se observa el grado de asociación o interdependencia existente entre variables, de tal modo que es posible establecer una primera aproximación de las variables independientes más influyentes en la explicación de la tafonización. Además contrasta la limitación del modelo de regresión relativa a la falta de correlación de las variables independientes.

R	ERROR ESTANDAR	PROBABILIDAD
0,85	0,66	0,95

	VALOR	ERROR ESTANDAR	PROBABILIDAD
CONSTANTE	0,00		
INDICE DE VACIOS	0,60	0,22	0,97
FELDESPATOS	-0,34	0,27	0,75
CONDUCTIVIDAD	-0,26	0,27	0,64

Fig. 8. Datos de la regresión múltiple para la variable que hace referencia a la forma de los tafonis

Statistical data from multiple regression for tafoni shape variable

Aunque no existen coeficientes de correlación muy significativos entre la variable dependiente y las independientes, parece clara una influencia prioritaria de las características texturales y mineralógicas de las areniscas, entre las que destacan el porcentaje de índice de vacíos, la cantidad de feldespatos y la presencia de sales puesta de manifiesto por la conductividad eléctrica. El resto de variables independientes aparecen escasamente correlacionadas con la dependiente, por lo que su influencia va a ser mínima.

Por otro lado, entre las variables independientes existen correlaciones significativas que conviene analizar. Los mejores índices corresponden a relaciones entre alguna de las tres variables independientes significativas con el resto, lo que nos indica que aunque no se incluyan en los cálculos estadísticos posteriores, sí están representadas indirectamente en la explicación general. Algunas de ellas pueden tener cierto significado geomorfológico como la correlación entre la altura al suelo y la conductividad eléctrica (-0,90) o carecer

absolutamente de él, como por ejemplo sucede entre la cantidad de feldespatos y la orientación de los tafonis (0,77).

Por tanto, solamente las tres variables independientes citadas inicialmente son consideradas en las regresiones múltiple y múltiple escalonada que explican la relación $x/y/z$ indicativa de la forma del tafoni. De esta manera favorecemos además la validez general de los datos estadísticos al considerar tres variables independientes y diez casos de análisis.

NUMERO ESCALON	NUEVA VARIABLE INCLUIDA	R	ERROR ESTANDAR	F-TEST
1	INDICE VACIOS	0,66	0,80	6,03
2	FELDESPATOS	0,82	0,65	7,04

Fig. 9. Regresión múltiple escalonada para la variable que hace referencia a la forma de los tafonis

Statistical data from stepwise múltiple regression for tafoni shape variable

El grado de influencia de las tres variables independientes cuando intervienen conjuntamente se puede conocer al efectuar una regresión múltiple. En la regresión general para la relación paramétrica $x/y/z$ se observa un coeficiente de correlación bueno (0,85) y valor de probabilidad significativo (0,95) (Fig. 8). Aunque el error estándar no es muy bajo (0,66) podemos considerar aceptable la regresión en conjunto. La tabla de coeficientes señala también una validez general de la regresión destacando la significación de los datos referentes al índice de vacíos de la arenisca. En conjunto la ecuación teórica de la regresión es la siguiente:

$$x/y/z = 0,60 \text{ Índice vacíos} - 0,34 \text{ Feldespatos} - 0,26 \text{ Conductividad}$$

Se ha utilizado la regresión múltiple escalonada para diferenciar las variables que aportan mejoras en la regresión de aquellas cuyo concurso no mejora los resultados. Se han utilizado valores estandarizados de 4 y 3,99 correspondientes a F de entrada y F de salida. La regresión solamente efectúa dos escalones, incluyendo en primer lugar la variable índice de vacíos y en segundo lugar la cantidad de feldespatos, dejando fuera el valor de la conductividad. Los datos correspondientes a esta regresión aparecen en la figura 9. Se observa como aumentan los valores de R y de F-Test, mientras disminuye el error estándar. En conjunto, las ecuaciones que explican la morfología de los tafonis son las siguientes:

(Escalón 1)

Forma ($x/y/z$) = 0,66 Índice de vacíos

(Escalón 2)

Forma ($x/y/z$) = 0,59 Índice de vacíos - 0,49 Feldespatos

5. Discusión

Existen autores que analizan cualitativa o cuantitativamente la nucleación y desarrollo de los tafonis. Sin embargo no existen observaciones ni modelos teóricos que analicen morfométricamente los tafonis e indiquen por qué aparece una morfología u otra. Según

Godard (1977) el desarrollo de los tafonis en areniscas se produce mediante un incremento en altura y en profundidad, debido a la disgregación granular y descamación que liberan las partículas. Estos mecanismos están asociados al papel que el agua juega en los procesos de humectación y secado. No obstante, señala también la posibilidad del haloclastismo en ambientes secos y cálidos con fuerte evaporación. Por otro lado, en rocas graníticas, Twidale (1982) señala como procesos activos que incrementan las dimensiones de las cavidades la expansión térmica, la presión de hidratación y la cristalización de sales. Este último proceso parece el más activo y el origen de las sales puede ser externo (transporte por el viento en costas y sebkhas desérticas) o interno (derivadas de los feldespatos y las micas). En esta misma región de la Depresión del Ebro Sancho & Benito (1990) establecen un modelo de caja negra en el cual la tafonización viene controlada por la inclinación de las superficies sobre las que se aparecen los tafonis, de tal modo que el inicio del proceso parece relacionado con la existencia puntual de minerales fácilmente alterables, como los feldespatos, y la evolución superficial y desarrollo tridimensional de las formas viene influenciado por fenómenos de haloclastismo y de humectación-secado.

A partir de estos trabajos se identifican, fácilmente, cuales son los procesos que producen la nucleación de las formas y hacen incrementar la superficie o volumen tafonizados pero no explican la causa del desarrollo de una morfología u otra. En este trabajo la clasificación morfométrica, basada en una ordenación jerarquizada, determina claramente cuatro clases de tafonis para el área de estudio, sin considerar el factor escala, relativo al tamaño de la microforma. Por otro lado, la existencia de unas morfologías u otras en una estación determinada, depende fundamentalmente de las características de la arenisca referentes a los valores del índice de vacíos, de los feldespatos y de la conductividad eléctrica. Es decir, los controles son de tipo textural y mineralógico, siendo más importantes los primeros. La relación paramétrica considerada ($x/y/z$) que define cada morfología va incrementando su valor progresivamente desde el tipo A hasta el tipo D apareciendo los siguientes rangos: tipo A: 0,031; tipo B: 0,064; tipo C: 0,091-0,139 y tipo D: 0,568-1,987.

Las ecuaciones del modelo estadístico de regresión indican que cuando tenemos valores bajos del índice de vacíos y altos de la cantidad de feldespatos y de la conductividad nos aproximamos hacia las clases A y B, mientras que al aumentar la primera variable y disminuir las otras dos restantes las clases resultantes son la C y D.

El índice de vacíos, es una aproximación de la porosidad de la arenisca y por tanto nos indica la posibilidad de circulación de soluciones en el interior de la roca. La presencia de agua en el sistema poroso de la arenisca puede alterar por procesos de hidrólisis los feldespatos componentes del esqueleto de la roca, así como activar procesos de humectación y secado. Finalmente la conductividad hace referencia a la cantidad de sales localizada en las areniscas y está relacionada con los procesos de haloclastismo.

Por tanto, la aparición de unas formas u otras de tafonis en las areniscas del anticlinal de Barbastro, bajo condiciones morfoclimáticas semiáridas, viene controlada por la circulación de soluciones a través del sistema poroso de la arenisca, activando procesos de hidrólisis de feldespatos, de humectación-secado y de haloclastismo.

Referencias bibliográficas

- Calkin, P. & Cailleux, A. 1962: A quantitative study of cavernous weathering (taffonis) and its application to glacial chronology in Victoria Valley, Antarctica. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 6:317-324.
- Cooke, R.U. 1979: Laboratory simulation of salt weathering processes in arid environments. *Earth Surface Processes and landforms*, 4:347-359.
- Dragovich, D. 1969: The origin of cavernous surfaces (tafoni) in granitic rocks of southern south Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 13:163-181.
- Evans, I.S. 1969-70: Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue Géomorphologie Dynamique*, 19:153-177.

- Fahey, B.D. 1983: Frost action and hydration as rock weathering mechanisms on schist: a laboratory study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8:535-545.
- Godard, A., 1977: *Pays et paysages du granite*. Le géographe, 21. Presses Universitaires de France, 232 p.
- Gutiérrez, M. & Ibañez, M.J. 1979: Las "ganmmas" de la región de Alcañiz". *Estudios Geológicos*, 35:193-198.
- Höllermann, P. 1975: Formen kavernöser verwitterung (tafoni) auf Teneriffa. *Catena*, 2:385-410.
- I.S.R.M. 1972: *Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties (Doc. n° 2)*. International Society for rock mechanics. Commission on standarization of laboratory and field tests, 81-94.
- Martini, J.P. 1978: Tafoni weathering, with examples from Tuscany, Italy. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 22:44-67.
- McGreevy, J.P. 1982: Frost and salt weathering: further experimental results. *Earth Surface processes and landforms*, 7:475-488.
- Mustoe, G.E. 1983: Cavernous weathering in the Capitol reef desert, Utah. *Earth surface processes and landforms*, 8:517-526.
- Rodríguez, J. & Navascués, L. 1982: La tafonización de las areniscas miocenas en los alrededores de Huesca. *Tecniterrae*, 19:7-12.
- Rögner, K. 1988: Measurements of cavernous weathering at Machtesh Hagadol (Negev, Israel) a semiquantitative study. *Catena Supplement*, 12:67-76.
- Sancho, C. 1988: *Geomorfología de la Cuenca Baja del río Cinca*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 743 p.
- Sancho, C. & Benito, G. 1990: Factors controlling tafoni weathering in the Ebro basin (NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 34:165-177.
- Sperling, C.H.B. & Cooke, R.U. 1985: Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environments. *Earth surface processes and landforms*:10, 541-555.
- Tena, J., Mandado, J. & García Anquela, J. 1984: Influencia de la recristalización de sales en los procesos de meteorización subaérea en el valle del Ebro. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10:189-200.
- Twidale, C.R. 1982: *Granite landforms*. Elsevier, 372 pp.
- Twidale, C.R. & Corbin, E.M. 1963: Gnammas. *Revue Geomorphologie Dynamique*, 14:1-20.
- Vidal-Román, J.R. 1983: *El Cuaternario de la provincia de La Coruña. Geomorfología granítica. Modelos elásticos de formación de cavidades*. Tesis Doctoral. Editorial de la Universidad Complutense de Madrid, 283 p.
- Williams, R.B.G. & Robinson, D.A. 1981: Weathering of sandstone by the combined action of frost and salt. *Earth surface processes and landforms*, 6:1-9.