



Morfometría y morfogénesis de tafoni en la Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires: su vinculación con la distribución de espeleotemas silíceos

Fernando LEBINSON¹, Silvia GRILL¹, Ana Laura FERNÁNDEZ² y Enzo VENEGA²

¹ Instituto Geológico del Sur, Departamento de Geología Universidad Nacional del Sur (UNS-CONICET), Bahía Blanca

² Departamento Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca

Email: fernando.lebinson@uns.edu.ar

Editores invitados: Adriana Mehl, Francisco Córdoba y Andrés Bilmes

Recibido: 7 junio, 2019
Aceptado: 17 octubre, 2019

RESUMEN

Con la finalidad de efectuar un aporte al proceso de tafonización de la Brecha Cerro Colorado (Sierras Australes de Buenos Aires) se realizó el análisis morfométrico y morfogenético de 56 tafoni mediante técnicas estadísticas. El estudio incluyó: ancho (x), profundidad (z), altura (y), orientación de los tafoni (o) y presencia / ausencia de espeleotemas silíceos (e). El análisis *cluster* permitió agruparlos en seis clases: A, B, C, D, E y F. Los tafoni clases A, B, C y D (27), ubicados en sectores más sombríos y húmedos del cerro, presentan el mayor tamaño, formas elipsoidales y una relación $x > z > y$; el 63 % de ellos desarrollaron espeleotemas silíceos. Los tafoni más pequeños, clase E (28), registraron una relación $x > z \approx y$, con una distribución aleatoria en el cerro; el 18 % de ellos presentó espeleotemas. Un único tafone, clase F, situado en el sector O del cerro, presentó una relación $z > x > y$, y no registra espeleotema. El análisis de componentes principales ratificó la diferenciación por tamaño de los tafoni (CP1), y vinculó las orientaciones preferenciales de los mismos con la presencia o ausencia de espeleotemas (CP2 y CP3). La mayoría de los tafoni relevados estuvieron asociados a algún tipo de fractura presente en el cerro, en donde las orientaciones más recurrentes de fracturación fueron NO-SE, NE-SO, N-S y en menor medida O-E. Este fracturamiento y la disposición del cerro, así como la estratificación y las características petrológicas de la Brecha Cerro Colorado, habrían favorecido el desarrollo de los tafoni.

Palabras clave: brechas, tafoni, clasificación, técnicas estadísticas, Argentina.

ABSTRACT

Morphometry and morphogenesis of tafoni in the Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes of the Buenos Aires Province: its relationship with the distribution of siliceous speleothems.

The aim of this article is to contribute to the knowledge of the tafoni weathering process of the Brecha Cerro Colorado (Sierras Australes of Buenos Aires Province), throughout a morphometric and morphogenetic analysis of 56 tafoni using statistical techniques. The study included: width (x), depth (z), height (y), tafoni orientation (o) and presence/absence of siliceous speleothems (e). A cluster analysis allowed grouping them into six classes: A, B, C, D, E and F. The tafoni classes A, B, C and D (27) are located in the most humid and shady areas of the hill. They have the largest size, ellipsoidal forms with a relation $x > z > y$ and 63% of them developed siliceous speleothems. The smallest tafoni, class E (28), showed a relationship $x > z \approx y$ with a random distribution on the hill, and an 18 % of them have speleothems. A single tafone without speleothem formation (class F) located in the western sector of the hill, presented a relation $z > x > y$. The principal components analysis allowed to differentiate the tafoni by size (1PC), and to relate preferential tafoni

orientations with the presence or absence of speleothems (2PC and 3PC). Most of the tafoni surveyed in the breccia were associated with some type of fractures present in the hill, with the most recurrent fractures being the NW-SE, NE-SW, N-S and to a lesser extent W-E. This fracturing, the arrangement of the hill, and the bedding and petrological characteristics of the Brecha Cerro Colorado, would have favoured the development of tafoni.

Keywords: breccias, tafoni, classification, statistical techniques, Argentina.

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la teoría general de sistemas de Chorley y Kennedy (1971, en Uña Álvarez 2012) cualquier forma del relieve es un sistema natural en continuo cambio. En relación a las formas menores, los tafoni, por ejemplo, han sido descritos por primera vez hace más de un siglo. Sin embargo, la discusión sobre su origen y los procesos involucrados en su evolución siguen manteniendo interés (Uña Álvarez 2012).

Las tafoni son cavidades o huecos originados en laderas rocosas inclinadas de dimensiones decimétricas hasta métricas, las cuales suelen presentarse solas o agrupadas. Sus secciones, que generalmente son circulares o elípticas, en ocasiones presentan un fondo cubierto por detritos (Mellor et al. 1997) el cual es factible de ser movilizado por el viento, la lluvia y la escorrentía (Gutiérrez Elorza 2008).

Su génesis y evolución están íntimamente relacionadas con factores que condicionan la velocidad e intensidad de la meteorización en puntos concretos de las rocas (Dragovich 1969). Los mismos se vinculan con debilidades texturales (zonas de menor cementación, contactos litológicos) y estructurales (juegos de diaclasas, planos de estratificación) de los afloramientos. Esto trae aparejado una desigual efectividad de los procesos de meteorización sobre dicha masa rocosa.

Acerca de las litologías involucradas en estos procesos, si bien se generan mayoritariamente en granitos y areniscas, también se reconocen en conglomerados, gneises y pórfidos (Goudie y Viles 1997, Goudie 2004). En rocas graníticas el proceso de tafonización ha sido atribuido específicamente a concentraciones de tensión gravitacional o tectónica en ciertos puntos de la roca en condiciones no subaéreas (Vidal Romaní 2008).

En relación a las condiciones climáticas, aunque los tafoni se desarrollan en climas variables (modelado azonal) dominan en ambientes costeros y climas áridos y semiáridos (cálidos o fríos) (Sancho y Gutiérrez 1990). En este caso, se asocian a procesos de descamación y desintegración granular debido a la haloclastia (Bradley et al. 1978, Twidale y Bourne 2008). Por otra parte, en climas fríos, estas geoformas pueden generarse por crioclastia, donde la presencia de sales

favorecería este tipo de meteorización (Ikeda 1994, French y Guglielmin 2000).

En las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires la presencia de tafoni ha sido mencionada con anterioridad, aunque no se han efectuado estudios específicos de ellos. En las Formaciones Providencia y Lolén del Grupo Ventana, compuestas por areniscas cuarcíticas, se han registrado algunos tafoni de tamaño reducido y dispersos en altura en la primera unidad (entre los 700 y los 900 m s.n.m.), mientras que en la segunda también se ha mencionado su presencia en diferentes sectores y sobre paredes de elevada pendiente (Gil 2010).

El presente trabajo involucra el análisis morfométrico y morfogenético de tafoni desarrollados en una brecha sedimentaria (Brecha Cerro Colorado, Andreis et al. 1971) aflorante en el valle de Las Grutas, entre las sierras de Bravard y Curamalal (Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires) (Fig. 1). El objetivo del mismo, es caracterizar estadísticamente las diferentes clases o tipos de tafoni asociados a estas litologías y analizar los procesos que habrían contribuido a su desarrollo y estado actual. Se evalúa además la relación entre las distintas clases y morfologías de tafoni y la presencia o ausencia de espeleotemas silíceos, considerando que estos últimos, constituyen un valioso *proxy-data* en la interpretación de las fluctuaciones climáticas del pasado. Esta contribución

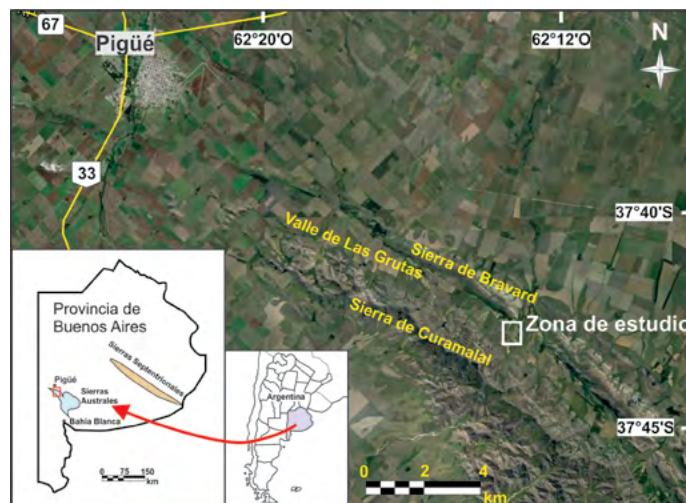


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

representa el primer estudio de tafoni en la Brecha Cerro Colorado, aflorante en el cerro Mariano (Sierras Australes).

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires corresponden a una faja corrida y plegada (Ramos 1984) con una extensión aproximada de 150 km. La zona de estudio está situada a 20 km al sureste de la localidad de Pigüé en el cerro Mariano (428 m s.n.m.), ubicado a lo largo de un gran valle de rumbo NO-SE entre las sierras de Curamalal y Bravard (Fig. 2 a-b). Estos cordones montañosos constituyen dos alineamientos subparalelos con dirección general NO-SE y disposición en suave arco convexo al norte (González Uriarte et al. 1988).

Los cordones de Curamalal y Bravard están integrados por rocas paleozoicas intensamente deformadas. Las unidades litológicas aflorantes a lo largo de la sierra de Curamalal corresponden al Grupo Curamalal (Harrington 1947) de edad cámbrica-ordovícica, el cual está dividido en cuatro formaciones denominadas: La Lola, Mascota, Trocadero e Hinojo. Este grupo está integrado en los niveles basales por conglomerados y en las unidades superiores se componen principalmente de cuarcitas (Harrington 1947). Por otra parte, en las sierras de Bravard afloran las Formaciones Bravard, Napostá y Providencia del Grupo Ventana (Harrington 1947) de edad ordovícica-devónica. Las mismas gradan, en general, desde cuarcitas y conglomerados en el inicio de la secuencia hasta cuarcitas, en la sección superior.

La estratificación de las rocas en ambos cordones se caracteriza por un rumbo de 140° (SE-NO) con buzamientos entre 40°-60° hacia el SO. Por lo cual, según la clasificación de Viers (1983) la secuencia conforma una estructura monoclinial de tipo *hogback*.

La secuencia paleozoica se encuentra intensamente fracturada. Han sido registrados cuatro juegos de diaclasas con orientaciones 005°, 040°, 080° y 120°, siendo predominante la fractura con orientación 040° (Lebinson y Grill 2018). En los primeros tres juegos, los buzamientos varían entre 63° y 82° con dirección, en general, al SE y en menor medida al NO, mientras que en el último el buzamiento varía entre 60-80° al NE. La fracturación dominante en las sierras de Curamalal y Bravard tiene una orientación NE-SO y se dispone perpendicular al rumbo de la estructura monoclinial. La traza de los arroyos que inciden transversalmente en las laderas (abras) presentan una orientación NE-SO (038°) similar a estructuras predominantes (Lebinson y Grill 2018).

En relación a la Brecha Cerro Colorado que aflora en el valle de Las Grutas (37°42'30"S; 62°12'57"O), forma parte de remanentes de una antigua superficie de erosión. Keidel (1916) y Harrington (1936) la asignaron al Cenozoico tardío, mientras que más recientemente Rabassa et al. (1995) lo hizo al Paleoceno. Considerando esta última edad, los valles y laderas sobre los que se apoya la Brecha Cerro Colorado, se habrían generado y expuestos al intemperismo, al menos desde el Cretácico Tardío. En consecuencia, el paisaje fluvial cretácico, rellenado por la Brecha Cerro Colorado, podría haberse formado a expensas de una planicie pre-existente más elevada (probablemente jurásica), y el drenaje superficial, reactivado en el Mioceno, habría seguido los lineamientos cretácicos preexistentes (Rabassa et al. 1995). Actualmente estos depósitos, dispuestos a lo largo del valle de Las Grutas, forman cerros mesas con orientación SO-NE, alcanzando alturas entre 420 y 490 m s.n.m.

Con respecto al clima, la zona de estudio, y el suroeste bonaerense, se sitúa en la faja de los climas templados de nuestro planeta, con temperaturas oscilantes entre 14°C y 20°C y estaciones térmicas bien diferenciadas. Las lluvias conceden características subhúmedas a esta variedad de clima templado, el cual es también denominado de transición (Campo de Ferreras et al. 2004). La variación espacial de las precipitaciones se relaciona con la continentalidad, orientación de la costa y corrientes oceánicas (Campo de Ferreras et al. 2004).

METODOLOGÍA

El estudio se inició con la identificación en una imagen satelital, tomada de *Google Earth*, de los remanentes de erosión de la Brecha Cerro Colorado, ubicados en el valle de Las Grutas (Fig. 2a). En relación a las tareas de campo, la primera etapa consistió en la observación de las características petrológicas y estructurales de los afloramientos. Con posterioridad, el estudio se centró en el afloramiento de la Brecha Cerro Colorado en el cerro Mariano (Fig. 2b), el cual resultó el más representativo del proceso de tafonización analizado en el presente trabajo. A continuación, y previa georeferenciación de 7 estaciones en el mencionado cerro (Fig. 3), se identificaron y midieron (con cinta métrica) los tafoni desarrollados en cada una de ellas. La ubicación espacial de los mismos, se efectuó mediante la utilización de brújula y dispositivo GPS. Las variables consideradas fueron: ancho (x); altura (y); profundidad (z), orientación (o) y presencia / ausencia de espeleotemas silíceos (e). Los valores promedio de las variables

x, y, z para todos los tafoni desarrollados en una misma estación, se analizaron en diagramas triangulares donde además se diferenciaron por la presencia o ausencia de espeleotemas silíceos (Fig. 3). Por otra parte, la frecuencia de sus orientaciones se evaluó a través de histogramas (Fig. 4). Finalmente se aplicaron técnicas estadísticas similares a las utilizadas en estudios morfométricos de rocas graníticas (Uña Álvarez 2004, Uña Álvarez et al. 2014, Roqué et al. 2011) y areniscas (Sancho y Gutiérrez 1990). El análisis *cluster*, aplicado sobre las variables x, y, z, se efectuó de acuerdo al método de Ward y mediante la utilización de la distancia euclidiana. El análisis de componentes principales (ACP) incluyó la totalidad de las variables medidas (x, y, z, o, e). Esta última (presencia / ausencia de espeleotemas) fue llevada, para su tratamiento estadístico, a escala ordinal (0-1). En función de la naturaleza de las variables (medidas en distintas unidades) se trabajó con la matriz de correlación. Para realizar los dos tratamientos estadísticos (agrupamiento y ACP) se utilizó el programa PAST 3.22 (Hammer et al. 2001).

RESULTADOS

Clasificación morfométrica de tafoni

Distribución de tafoni: En la estación 1 (E1) ubicada en el sector suroeste del cerro se midieron 11 (n° 1-11) tafoni cuyas dimensiones varían entre 12 - 293 cm (x), 10 - 67 cm (y) y 11 - 147 cm (z) (Fig. 3). Con respecto a las orientaciones (Fig. 4), se observa que predominan hacia el S-SO (180°-258°). En este sector del cerro solo un tafone presenta espeleotemas silíceos. En la estación 2 (E2) ubicada en el sector oeste del cerro se midieron 9 (n° 12-20) tafoni cuyas dimensiones varían entre 16 - 275 cm (x), 15 - 72 cm (y) y 8 - 120 cm (z). Con respecto a las orientaciones, se observa que predominan hacia el O-SO (270°-190°). De igual manera que en la estación anterior, solo un tafone presenta espeleotemas silíceos. En la estación 3 (E3) ubicada en el sector noroeste del cerro se midieron 6 tafoni cuyas dimensiones varían entre 55 - 450 cm (x), 29 - 125 cm (y) y 2 - 2 420 cm (z). Con respecto a las orientaciones (Fig. 3), se observa que predominan hacia el NO-O (330°-252°). En este sector del cerro solo dos tafoni presentan espeleotemas silíceos y corresponden a los de mayor tamaño. En la estación 4 (E4) ubicada en el sector N-NE del cerro se midieron 8 tafoni cuyas dimensiones varían entre 31 - 443 cm (x), 12 - 108 cm (y) y 11 - 235 cm (z); predominan las orientaciones hacia el N-NO (008°-308°) (Fig. 4). Como en la estación anterior, en este sector del cerro solo dos tafoni presentan espeleotemas silíceos registrándolos en los de

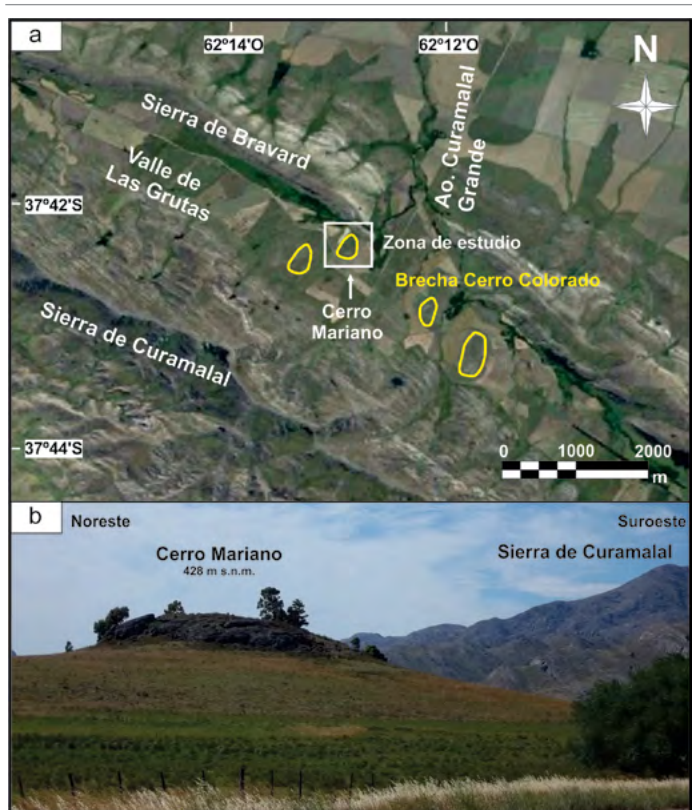


Figura 2. a) Ubicación del cerro Mariano y de los afloramientos de la Brecha Cerro Colorado a lo largo del valle de Las Grutas; b) Detalle del cerro donde se realizó el estudio.

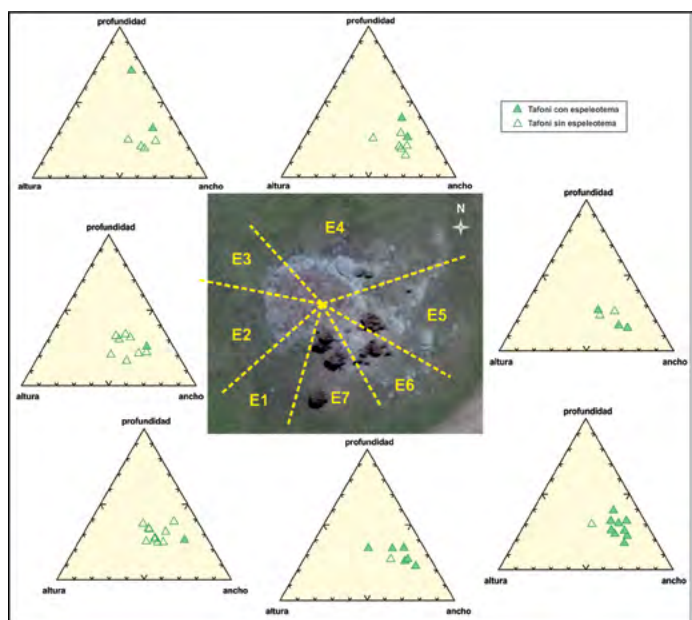


Figura 3. Ubicación de las 7 estaciones de medición de tafoni con sus respectivos diagramas triangulares (x, y, z).

mayor tamaño. En la estación 5 (E5) ubicada en el sector E del cerro se midieron 5 tafoni cuyas dimensiones varían entre 32 - 500 cm (x), 22 - 150 cm (y) y 20 - 115 cm (z), con orientaciones dominantes hacia el E (63°-95°). En este sector del

cerro más de la mitad de los tafoni presentan espeleotemas. En la estación 6 (E6) ubicada en el sector E del cerro se midieron 10 tafoni cuyas dimensiones varían entre 51 - 760 cm (x), 22 - 155 cm (y) y 38 - 430 cm (z), y orientaciones predominantes hacia el SE-S (165°-100°). En este sector del cerro, a excepción de un tafone, los demás presentan espeleotemas silíceos. En la estación 7 (E7) ubicada en el sector S del cerro se midieron 7 tafoni cuyas dimensiones varían entre 28 - 670 cm (x), 27 - 140 cm (y) y 29 - 290 cm (z), aquí se observan orientaciones predominantes hacia el SE-S (155°-200°). En este sector del cerro, como en la estación anterior, solo un tafone no presenta espeleotemas silíceos.

Análisis cluster: El análisis de agrupamiento sobre las mediciones efectuadas (x, y, z) en los 56 tafoni analizados, arrojó 6 grupos que se asignaron a las Clases A, B, C, D, E y F, con distancias vinculares inferiores a 75 (Clases D y E), 150 (Clases B y C), 225 (Clase A) y 375 (Clase F) (Fig. 5). La Clase A comprende los tafoni n° 49, 50 y 56 (estaciones 6 y 7), donde $x > z > y$; el valor promedio de x (688 cm), es el mayor registrado para todos los tafoni medidos y duplica o triplica a las variables restantes. La Clase B incluye los tafoni n° 22, 28, 37, 39 y 44 (estaciones 3, 5 y 6), la variable x sigue siendo la más importante en relación a las restantes, aunque su promedio alcanza 435 cm; se mantiene la relación $x > z > y$ y excepto en los tafoni n° 37 y 39 donde la variable y supera a z. La Clase C contiene los tafoni n° 34, 51, 10, 12 y 42 (estaciones 1, 2, 4, 6 y 7), la variable x supera nuevamente a las restantes, se mantiene la relación $x > z > y$ pero el promedio de esta variable es de 294 cm. y a su vez la variable y en ningún caso supera 100 cm. El promedio de esta variable (78 cm) se redujo considerablemente en relación con la clase anterior. La Clase D abarca 14 tafoni, n° 13, 46, 55, 25, 52, 35, 31, 26, 27, 45, 53, 7, 40 y 41, pertenecientes a las 7 estaciones estudiadas; la variable x supera nuevamente a las restantes pero su valor promedio alcanza 162 cm y las restantes tienen un valor promedio de 87 cm (z) y 55 cm (y); las tres variables han disminuido particularmente en relación a las dos primeras clases (A y B). La Clase E reúne 28 tafoni, n° 18, 20, 29, 43, 5, 48, 8, 24, 2, 11, 30, 6, 14, 17, 33, 54, 1, 3, 9, 38, 4, 15, 16, 19, 23, 32, 36 y 47, también distribuidos en las 7 estaciones estudiadas; si bien se mantiene la relación $x > z \sim y$ y sus valores promedio disminuyen notablemente (50, 28 y 29 cm respectivamente). La Clase F involucra al tafone n° 21 de la estación 3; este se destaca porque es el único en el cual $z > x > y$, alcanzando la variable "z" el valor más importante de todos los tafoni estudiados: 420 cm.

Componentes principales: El Análisis de componentes principales aplicado sobre la matriz de datos (56 muestras

por 5 variables: x, y, z, o, e) permitió obtener los autovalores y autovectores; las correlaciones de las componentes con las variables y el producto de las observaciones estandarizadas por los autovectores (Cuadro 1). Las dos primeras componentes principales (CP) explican el 81% de la varianza del sistema y la incorporación de la tercera el 92 % de la varianza total. Por lo cual resultó razonable utilizar las tres primeras componentes (Kaiser 1960).

La CP1 presenta alta correlación positiva con las dimensiones de los tafoni, menor con los espeleotemas y correlación negativa con la orientación de los mismos. La CP2 tiene alta correlación positiva con la orientación, menor con las dimensiones de los tafoni y correlación negativa con los espeleotemas. La CP3 posee alta correlación positiva con los espeleotemas y menor con la orientación de los tafoni (Cuadro 2).

El análisis de la proyección de las variables sobre el plano definido por la CP1 y CP2, muestra dos grupos de tafoni diferenciados por su tamaño y por la presencia o ausencia de espeleotemas (Fig. 6a). En los cuadrantes I y IV en torno a la CP1 se agrupan los tafoni más grandes, la mayoría de los cuales presentan espeleotemas (excepto tafoni: n° 21 y 49) y en los cuadrantes II y III se concentran los más pequeños y solo 3 de ellos (tafoni n° 38, 43 y 54) registran espeleotemas (Fig. 6a). A su vez, en torno a la CP2 se separan los tafoni orientados hacia el SO-NO (150°- 350°, cuadrantes I y II), de los orientados al NNE-SSO (<10°-200°, cuadrantes III y IV). En relación a la primera orientación solo el 17 % de los tafoni (n° 12, 22, 28, 50, 56) presentan espeleotemas, de los cuales

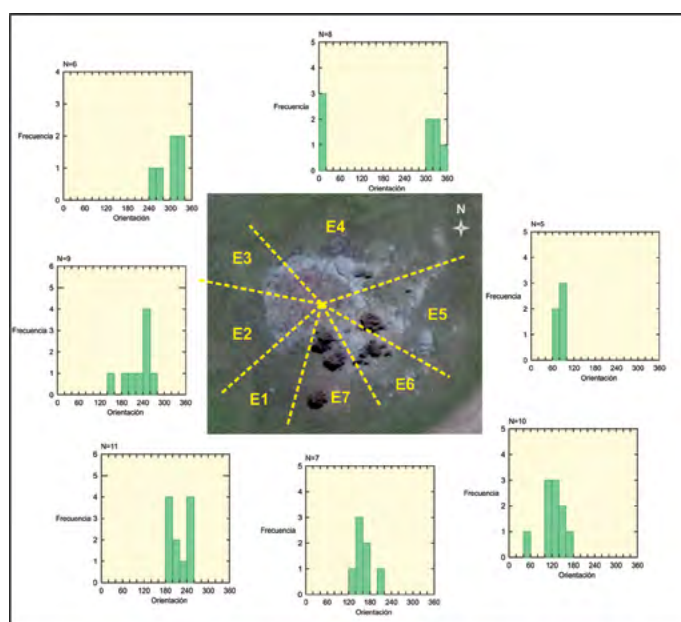


Figura 4. Histogramas de las orientaciones de los tafoni medidos en cada estación.

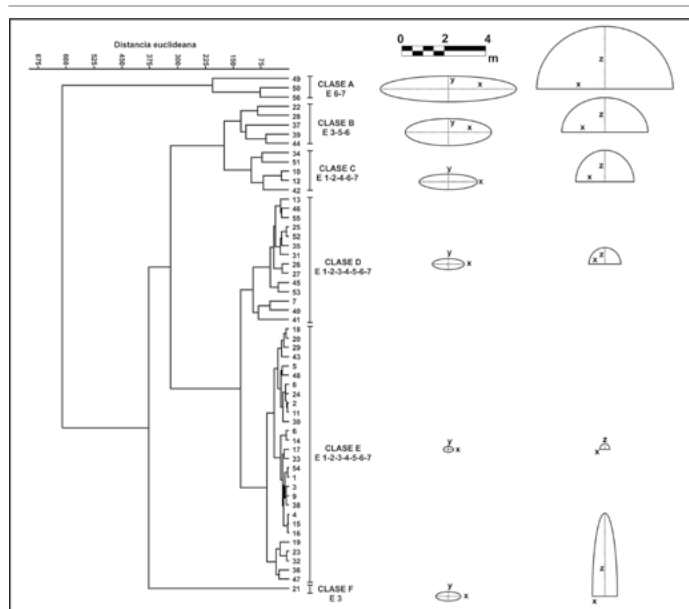


Figura 5. Dendrograma *cluster* de los 56 tafoni medidos en el cerro Mariano. El primer número indica el tafone y luego las distintas clases (A-F) en que se agrupan los datos haciendo referencia también a que estaciones (E) corresponden. Al lado de las clases se pueden observar las morfologías que caracterizan a cada una en relación a los valores x, y, z.

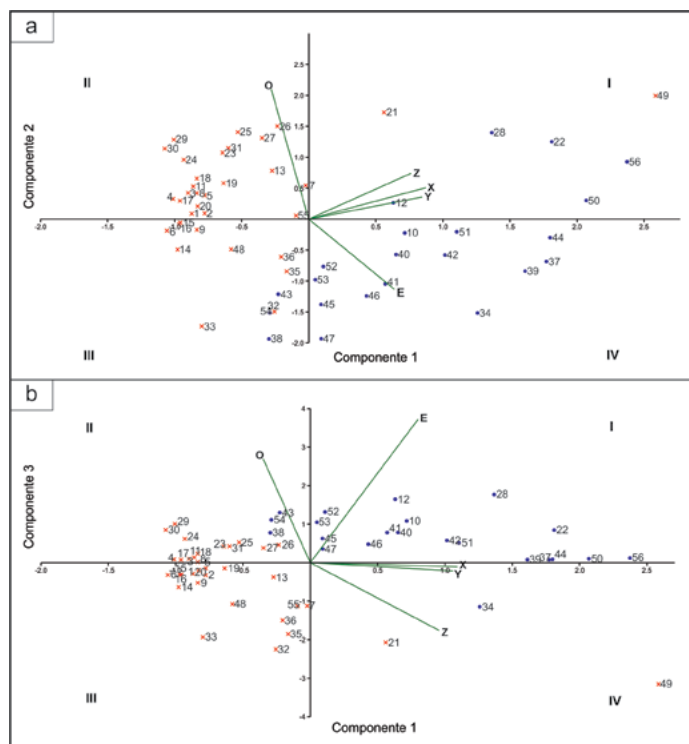


Figura 6. a) Diagrama de dispersión y proyecciones de las variables en el plano de la CP1 y CP2. b) Diagrama de dispersión y proyecciones de las variables en el plano de la CP1 y CP3. X: ancho; Y: altura; Z: profundidad; O: orientación; E: espeleotemas.

el 50 y 56 orientan al SE. En cambio, el 63% de los tafoni orientados al NNE-SSE si registran espeleotemas.

La proyección de las variables en el plano definido por la

CP1 y CP3 profundiza las relaciones entre las variables espeleotemas (e) y orientación (o) de los tafoni. De este modo se agrupan los tafoni portadores de espeleotemas en direcciones preferenciales en el cerro (Fig. 6b). Así, por un lado, se concentran en los cuadrantes I y II los tafoni orientados al NNE-ESE (<10°-190°) de los cuales el 60 % presentan espeleotemas y en los cuadrantes III y IV los tafoni orientados hacia el ESE(SO)-NNO (150°-350°) caracterizados por la ausencia de espeleotemas (a excepción del tafoni n°34 que se destaca por su profundidad z y posee espeleotema). Los tafoni n°: 21 y 49 constituyen outliers (n° 21: z>> x y 49: x>>z) (cuadrante IV) y tampoco poseen espeleotemas (Fig. 6b).

Aspectos estructurales y petrológicos

Los afloramientos de la Brecha Cerro Colorado, se destacan por disponerse en estratos subhorizontales en discordancia angular sobre las rocas paleozoicas basculadas. Los planos de estratificación de las brechas no son fácilmente identificables debido a la litología, pero suelen distinguirse más claramente en los sectores donde los clastos tienen menor tamaño. Estructuras como las diaclasas son visibles en estas rocas (Fig. 7); se midieron 16 fracturas a lo largo del cerro Mariano, de las cuales se identificaron 4 juegos principales de fracturación (Fig. 8a-c). Un primer juego de diaclasas con orientación NE-SO con buzamientos entre 60-80° con

Cuadro 1. Autovalores de la matriz de correlación y porcentaje de la varianza total asociada con las CP en el orden de los autovalores.

PC	Autovalores	% varianza
1	2.97537	59.507
2	1.14466	22.893
3	0.490021	9.8004
4	0.30652	6.1304
5	0.0834266	1.6685

Cuadro 2. Correlación de las componentes.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
X	0.94315	0.21111	-0.015294	-0.1199	-0.22646
Y	0.91463	0.14864	-0.030669	-0.3361	0.16569
Z	0.82545	0.30815	-0.25009	0.39643	0.063078
O	-0.30269	0.87219	0.38312	0.025294	0.01586
E	0.69014	-0.47153	0.5287	0.14623	0.021405

X: anchura; Y: altura; Z: profundidad; O: orientación; E: espeleotemas.

dirección al NO principalmente y en menor medida al SE (Fig. 7a); otro juego con orientación ONO-ENE con buzamientos

entre 50° y 85° con dirección tanto al norte como al sur; otro con orientación NO-SE con buzamientos entre $55-70^\circ$ con dirección al SO y en menor medida al NE (Fig. 7b). El tercer juego de rumbo NO-SE con buzamientos entre $55-70^\circ$ con dirección al SO y en menor medida al NE, y el último juego con rumbo N-S con buzamientos de $55-73^\circ$ con dirección tanto al E como al O (Fig. 7c y d).

Asimismo, a partir de la imagen satelital del afloramiento se han podido interpretar fracturas de gran extensión que afectan al cerro (Fig. 8 a-b). Estas estructuras tienen orientación NO-SE, NE-SO y E-O (Fig. 8b-c), y son coincidentes con las orientaciones de las diaclasas medidas en el afloramiento (Fig. 8 a y b). Las fracturas con orientación NE-SO y NO-SE tienen una extensión entre 25-42 m, mientras que las fracturas de orientación O-E son de menor tamaño, entre 6 y 11 metros (Fig. 8 b).

Acerca de la petrología de la brecha aflorante en el sector de estudio, cuyo espesor alcanza 15 m, se clasifica de acuerdo a Folk et al. (1970) como una brecha areno-fangosa con cemento silíceo-ferruginoso. La fracción grava posee dimensiones que varían entre 2 mm y 25 cm y está compuesta por fragmentos líticos de cuarcitas blancas y rosadas junto a filitas cuarzosas rosadas, marcando su proveniencia de los adyacentes cordones de Curamalal y Bravard. La matriz areno-fangosa está constituida por cuarcitas, filitas, feldespatos, cristales de cuarzo detrítico y minerales de arcilla (alunita entre ellas). El cemento es de dos tipos, uno silíceo (principalmente compuesto por ópalo) y otro ferruginoso (hematítico) que le otorga el típico color rojizo a esta unidad. También existen registros de revestimientos argílicos de grano y poros, por lo que se presume que el proceso de cementación tuvo lugar en un contexto pedológico (Folguera et al. 2017).

Los tafoni presentes en las brechas están desarrollados en general a lo largo de los planos de estratificación de la secuencia sedimentaria. En todos los casos, están en contacto con fracturas de diferentes orientaciones que favorecieron la generación de los mismos (Fig. 7 a-d). En el diagrama de rosas (Fig. 8c) se grafican las orientaciones de los tafoni, destacándose como predominantes: NO-SE, E-O y NE-SO. Las mismas coinciden con las orientaciones de fracturas que afectan a la Brecha Cerro Colorado.

DISCUSIÓN

La diversidad morfológica que suelen presentar los tafoni se vincula, en general, con la relación proceso-forma (Uña Álvarez 2012) y se asocian a procesos azonales. La mayoría

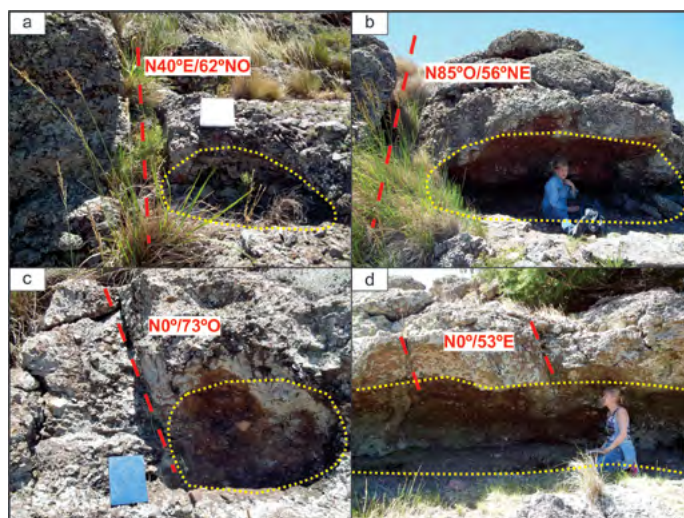


Figura 7. a-d) Fracturas medidas en la Brecha Cerro Colorado. En línea punteada amarilla se indican los tafoni.

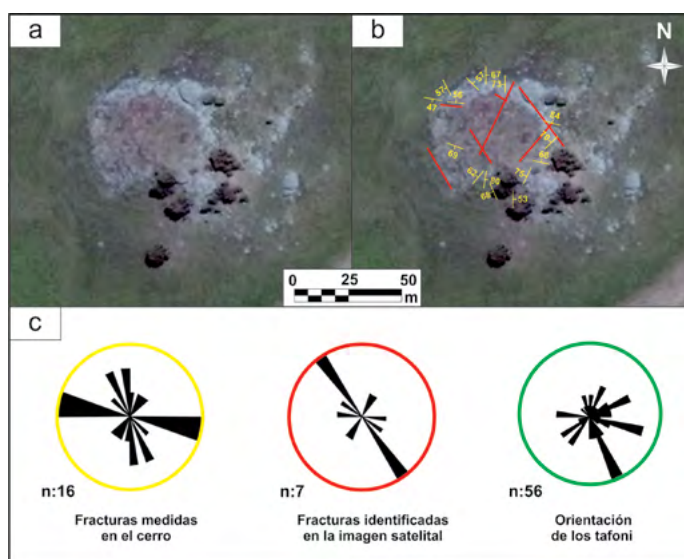


Figura 8. a-b) Imagen satelital tomada de Google Earth del cerro Mariano. Los datos en color amarillo representan las diaclasas medidas en el afloramiento, mientras que las líneas rojas son las fracturas identificadas en la imagen; c) Diagramas de rosas de las diaclasas, y de las fracturas reconocidas en la imagen que afectan a la Brecha Cerro Colorado y la orientación de los tafoni.

de los estudios sobre estas geoformas han sido realizados en rocas graníticas y areniscas (Vidal Romaní y Yepes Temiño 2004, Uña Álvarez 2004, Uña Álvarez 2012, Uña Álvarez et al. 2014, Sancho y Gutiérrez 1990, entre otros). En el estudio de la formación de tafoni en areniscas, se ha otorgado al agua un rol muy importante en los mecanismos de formación de estas geoformas. En especial se asocia el agua al proceso de humectación/secado y de haloclastismo en climas secos y cálidos (Sancho y Gutiérrez 1990). Por otra parte, en los granitos, en general, las geoformas responden a procesos endógenos asociados a las distintas etapas de consolidación

del magma o a su deformación en su camino ascendente, sin tener significado climático (Vidal Romaní y Yepes Temiño 2004).

En el presente estudio, el análisis *cluster* efectuado en los tafoni de la Brecha Cerro Colorado, permitió efectuar una clasificación morfométrica. Se determinaron 6 clases de tafoni, diferenciados particularmente por su tamaño. El análisis de otras características tales como la orientación de los tafoni en el cerro, presencia o ausencia de espeleotemas silíceos y asociación con el fracturamiento, permitió una mejor caracterización de los mismos.

De este modo del estudio efectuado surge que las clases A, B, C, y D (27 tafoni), de los cuales el 63% presenta espeleotemas silíceos, mantienen la relación $x > z > y$, perteneciendo los más grandes a las clases A y B. A su vez, los tafoni de la clase A, ubicados en el sector sur del cerro, orientan hacia el S-SE y están limitados por fracturas con orientaciones N-NE. Los tafoni de la clase B, localizados en el sector NO y SE del afloramiento, con orientaciones O-NO están condicionados por fracturas con rumbo E-SE y N-S. En cambio, los tafoni de las clases C y D, distribuidos a lo largo de todo el cerro, con tamaños que disminuyen desde C a D, se asocian a fracturas con orientación NO-SE y NE-SO. En cuanto a la clase E, reúne la otra mitad de tafoni analizados (28), siendo su característica más notable su reducido tamaño y la relación entre los parámetros morfométricos $x > z \sim y$. Estos tafoni distribuidos también en todo el afloramiento de la brecha, se asocian a fracturas con orientación NO-SE, N-S y NE-SO y solo el 18 % de ellos presentan espeleotemas silíceos. Esta última característica sumada a su reducido tamaño permite inferir que se trata de oquedades más recientes que las correspondientes a las clases anteriores (A, B, C y D). Finalmente, la clase F involucra un único tafone caracterizado por la relación morfométrica $z > x > y$, con orientación O-SO y afectado por una fractura con orientación O-E, el mismo no presenta espeleotema silíceo.

En relación al análisis de componentes principales, la 1° CP permitió diferenciar a los tafoni de mayor tamaño de los más pequeños, mientras que la 2° CP agrupó los tafoni orientados hacia el SO-NO (150° - 350°) caracterizados por poseer solo el 17% de espeleotemas silíceos, de los orientados al NNE-SSO ($<10^\circ$ - 200°) con 63% de espeleotemas. Al mismo tiempo, la 3°CP reforzó el análisis de la 2° CP pero además discriminó un grupo de tafoni carentes de espeleotemas silíceos orientados hacia el ESE(SO)-NNO (150° - 350°) de los orientados al NE-ESE ($<10^\circ$ - 190°) con más del 60% de espeleotemas.

En relación específica a los depósitos de la Brecha Cerro

Colorado (en la cual se desarrollan los tafoni) y considerando la litología y posición topográfica que ocupan, se considera que representan remanentes de antiguos conos de deyección y de depósitos de remoción en masa acumulados en las partes bajas del relieve existente en ese momento (Folguera et al. 2017). Fracturas con dirección similar en el cerro Mariano y en los cordones serranos, permiten inferir que la posición actual de la Brecha Cerro Colorado es aproximadamente igual a la original, tal como lo proponen Andreis et al. (1971). El aspecto mencionado anteriormente también sustentaría una edad para el depósito y proceso pedológico involucrado, Cretácico /Paleoceno de acuerdo a Zárate et al. (1995, 1998), entre otros. Su escaso transporte y rápida sedimentación, asociada a episodios torrenciales, es avalada por la angulosidad y mala selección de sus clastos (2 mm / 25 cm). Otra característica notable es la grosera estratificación y alternancia de bancos en los que predominan la fracción gruesa, mediana o pequeña (casi en su totalidad de cuarcitas). En lo referente a las fracturas inferidas a partir de la imagen en el cerro Mariano y medidas en la brecha (diaclasas), surge que la orientación más importante es NO-SE.

Por otra parte, la disposición actual de estos remanentes en el valle, paralelos a los cordones serranos (NO-SE), determina distinta exposición a la insolación. Así las laderas ubicadas al S / SE con menor insolación generan ambientes más húmedos y fríos, mientras que las expuestas al N / NE, están sometidas a variaciones térmicas mayores (Gil 2010). Estas situaciones particulares, sumadas a las características litológicas y estructurales descritas anteriormente, habrían influido en los procesos exógenos que las han afectado.

En consecuencia, considerando el fracturamiento notable en el cerro Mariano y la heterogeneidad de los depósitos (en

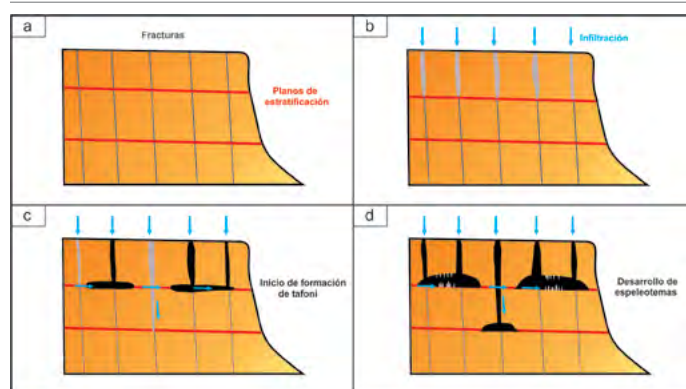


Figura 9. Modelo de evolución de tafoni en la Brecha Cerro Colorado (modificado de Wray y Sauro 2017): a) Etapa inicial de la roca sin alterar; b) El agua de lluvia se infiltra a través de las fracturas de las rocas; c) Los tafoni se generan a lo largo de los planos de estratificación que se hallan en contacto con las áreas fracturadas; d) Repetidos procesos de meteorización y posterior erosión provocan el aumento de tamaño de los tafoni, en los cuales posteriormente se formarán espeleotemas silíceos.

relación al tamaño de clastos y composición) se infiere que el agua penetraría a través de las fracturas (Fig. 9 a- b) y se esparciría por los planos de estratificación de las brechas, alterando los minerales más susceptibles (feldespatos, micas, etc.) (Fig. 9 b). El mayor desarrollo que presentan la mayoría de los tafoni analizados en relación a la variable x (ancho) sustenta una acción preferencial del agua en esta dimensión.

Episodios de humectación / secado también habrían contribuido a la fragmentación y generación de partículas más pequeñas, las cuales junto a los neominerales formarían un grupo de materiales más susceptibles a la erosión. La presencia de fracturas de menor dimensión (Fig. 7) favorecería también la penetración del agua en las brechas. Este proceso repetido a través del tiempo habría beneficiado la generación y el agrandamiento de las oquedades (Fig. 9c), particularmente la anchura de los tafoni. A su vez los tafoni de mayor tamaño y ubicados en lugares más húmedos y sombríos habrían favorecido el desarrollo de espeleotemas silíceos (Fig. 9d).

Recientemente Grill y Lebinson (2018) han dado a conocer la presencia de importante cantidad de materia orgánica (granos de polen, esporas de hongos, algas, partículas de carbón) en los espeleotemas silíceos que se desarrollan en estos tafoni. De acuerdo a Vidal Romaní et al. (2003) el material biológico favorecería la disolución de la sílice, que posteriormente se acumula en grietas abiertas y en las paredes de los tafoni. Además, según Aubrecht et al. (2008), la fase biológica sería esencialmente la responsable de la generación de espeleotemas silíceos.

CONCLUSIONES

Considerando que los afloramientos de la Brecha Cerro Colorado, roca portadora de los tafoni, se distribuyen ≈ 60 km en las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires, este trabajo representa el inicio de estudios que permitirían ampliar o rectificar las conclusiones del presente. Esto último, considerando particularmente, que la génesis de la brecha se asocia a la erosión de los cordones lindantes (o próximos al lugar de depósito) los cuales varían su composición, siendo predominante rocas con importante cantidad de sílice (cuarcitas) intensamente fracturadas.

En relación a los estudios morfométricos del análisis *cluster* surge que aproximadamente la mitad de los tafoni medidos (27) agrupados en las clases A, B, C y D, mostraron el mayor tamaño, formas elipsoidales y relación entre variables $x > z > y$, siendo la mayoría de ellos portadores de espeleotemas silíceos. Estos tafoni se desarrollaron en las laderas más hú-

medas y sombrías del cerro (sectores SO y SE). La otra mitad reúne a los tafoni más pequeños, clase E (28), sin ubicación preferencial en el cerro, con una relación: $x > z \approx y$ y en general carentes de espeleotemas silíceos. Un único tafone (clase F) situado en el sector O del cerro, presentó una relación $z > x > y$ y ausencia de espeleotema silíceo. El análisis de componentes principales (CP1) ratificó la diferenciación por tamaño arrojada por el análisis *cluster*, diferenciando los tafoni de mayor tamaño (la mayoría portadores de espeleotemas silíceos), de los más pequeños (que mayoritariamente no los tienen). Las 2 y 3 CP permitieron discriminar tafoni con y sin espeleotemas silíceos, de acuerdo a la orientación de los mismos en el cerro. Por lo tanto, se destaca que esta clase de análisis es de gran ventaja para estudios morfométricos en tafoni.

Acerca de la génesis de los tafoni y su evolución, la mayoría de los tafoni relevados estuvieron asociados a algún tipo de fracturación presente en la brecha, siendo las fracturas más recurrentes las de orientación NO-SE, NE-SO, N-S y en menor medida O-E. Este fracturamiento del cerro como la estratificación (aún pobre / grosera) de los depósitos y sus características petrológicas habrían sido las causas más importantes al momento de la alteración de los depósitos originales (Brecha Cerro Colorado). Las dos primeras características habrían jugado un rol importante en las etapas iniciales del desarrollo de los tafoni.

A su vez, las características petrológicas (matrix y cemento con distinta composición mineral y en consecuencia resistencia diferencial a su alteración) habrían favorecido la evolución de los mismos a través del tiempo. Es probable que los tafoni más pequeños con una distribución aleatoria en el cerro puedan tener una vinculación más estrecha con las variaciones litológicas de los depósitos; particularmente aquellos sectores donde las fracciones con granulometrías más finas, o más fácilmente alterables, revisten mayor importancia en el afloramiento (ej. cuarzo detrítico, arcillas, etc.).

La presencia de espeleotemas silíceos en la mayoría de los tafoni más grandes, supone una mayor edad de estos en relación a los más pequeños (la mayoría carentes de espeleotemas), considerando el tiempo prolongado que requiere la sílice para su disolución. A su vez, la ubicación de los tafoni portadores de espeleotemas silíceos en los sectores más húmedos y sombríos del cerro (SO y SE) permite inferir que estas características microclimáticas sumadas a la importante cantidad de material biológico que portan los espeleotemas, habrían contribuido en el proceso de disolución de la sílice.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Geología

(UNS) y al Instituto Geológico del Sur por el apoyo logístico y financiero. Este trabajo fue financiado a través del PGI 24/H141, subsidiado por S.E.C.Y.T. (U.N.S.). Las revisiones realizadas por las Dras. Marcela Cioccale y Emilia Aguilera contribuyeron notablemente a mejorar este trabajo. Se agradece también a la Estancia Los Huecos por permitir trabajar en sus campos.

REFERENCIAS

- Andreis, R.R., Spalletti, L.A. y Mazzoni M.M. 1971. Sedimentología de la Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires, en: Reunión Sobre La Geología de Las Sierras Australes Bonaerenses. Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), p. 65-96, Bahía Blanca.
- Aubrecht, R., Brewer-Carías, Ch., Smida, B., Audy, M. y Kovácik, L. 2008. Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstones cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela. *Sedimentary Geology* 203: 181-195.
- Campo de Ferreras, A., Capelli de Steffens, A.M. y Diez, P. 2004. El clima del Suroeste bonaerense. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, 105 p., Bahía Blanca.
- Bradley, W.C., Hutton, J.T. y Twidale, C.R. 1978. Role of salts in development of granitic tafoni. South Australia. *Journal of Geology* 86: 647-654.
- Chorley, R.J. y Kennedy, B.A. 1971. *Physical Geography: A Systems Approach*. Prentice-Hall, 370 p., London.
- Dragovich, D. 1969. The origin of cavernous surfaces (tafoni) in granitic rocks of southern South Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie* 13: 163-181.
- Folguera, A., Etcheverría, M., Zárate, M. y Escosteguy, L. 2017. Hola Geológica 3963-II Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Boletín 425, 102 p., Buenos Aires.
- Folk, R.L., Andrews, P.B. y Lewis, D.W. 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand, New Zealand *Journal of Geology and Geophysics* 13: 937-968.
- French, H.M. y Guglielmin, M. 2000. Cryogenic weathering of granite, Northern Victoria Land, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 305-314.
- Gil, V. 2010. Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur (inédita), 262 p., Bahía Blanca.
- González Uriarte, M., Carballo, O., Aldacour, H. y Calmels, A. 1988. Geomorfología de la Sierra de Bravard y su piedemonte. 2° Jornadas Geológicas Bonaerenses, 173-185, Bahía Blanca.
- Goudie, A. y Viles, H.A. 1997. *Salt weathering hazards*. Wiley, 256 p., Chichester-New York.
- Goudie, A.S. 2004. Tafoni. En: Goudie, A.S. (ed), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, 1034-1035, London.
- Grill, S. y Lebinson, F. 2018. Primeras evidencias de espeleotemas síliceos en la Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Séptimo Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Libro de resúmenes: 348-349, Puerto Madryn.
- Gutiérrez Elorza, M. 2008. *Geomorfología*. Prentice Hall, 898 p., Madrid.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontology Electronica* 4 (1): 9pp.
- Harrington, H.J. 1936. El Conglomerado rojo de las Sierras Australes de Buenos Aires y sus relaciones con el relieve de montaña. Museo de La Plata, Obra del Cincuentenario: 11-184.
- Harrington, H.J. 1947. Explicación de las Hojas Geológicas 33m y 34m, Sierras de Curamalal y de la Ventana, Provincia de Buenos Aires. Servicio Nacional de Minería y Geología. Boletín 61, 42 p. Buenos Aires.
- Ikeda, H. 1994. Topography study of a granite cave - the example of a cave discovered in a mountain in the northern part of Seoul, Korea. *Memoirs of Nara University* 22: 1-14.
- Kaiser, H.F. 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement* 20(1): 141-151.
- Keidel, J. 1916. La geología de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires y su relación con las montañas del Cabo y los Andes. *Anales Dirección de Geología y Minería* 9, 3 p., Buenos Aires.
- Lebinson, F. y Grill, S. 2018. Control estructural en el drenaje superficial del sector norte de las Sierras de Curamalal y Bravard, provincia de Buenos Aires, Argentina. Séptimo Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Libro de resúmenes: 322-323, Puerto Madryn.
- Mellor, A., Short, J. y Kirkby, S.J. 1997. Tafoni in the El Chorro area, Andalucía, southern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 22: 817-833.
- Ramos, V.A. 1984. Patagonia: un continente paleozoico a la deriva? 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 311-325, San Carlos de Bariloche.
- Rabassa, J., Zárate, M., Camilión, C., Partridge, T. y Maud, R. 1995. Relieves relictuales de Tandilia y Ventania. 4° Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses Actas, 1: 259-256, Junín.
- Roqué, C., Linares, R., Rodríguez, R. y Zarroca, M. 2011. Granite caves in the north-east of the Iberian Peninsula: Artificial hypogea versus tafoni. *Zeitschrift für Geomorphologie* 55(3): 341-364.
- Sancho, C. y Gutiérrez, M. 1990. Análisis morfogenético de la tafonización de la arenisca de Peraltilla (Anticlinal de Barbastró, Depresión del Ebro): Influencia de los factores mineralógico-texturales. *Cuaternario y Geomorfología* 4: 131-145.
- Twidale, C.R. y Bourne, A. 2008. Caves in granitic rocks: types, terminology and origins. *Cadernos Laboratorio Xeológico de Laxe* 33: 35-57.
- Uña Álvarez, E. de. 2004. Tafoni en rocas graníticas. Primera valoración estadística sobre las tasas de desarrollo en el macizo de Ourense

- (Galicia, NW de la Península Ibérica). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 29: 265-289.
- Uña Álvarez, E. de. 2012. Interpretación de sistemas naturales complejos. El problema de los tafoni. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 60: 349-368.
- Uña Álvarez, E. de., Vidal Romaní, J.R. y Sanjurjo-Sánchez, J. 2014. Diversificación interna de los tafoni. resultados de un estudio piloto en el Macizo de Ourense (Galicia, NW del Macizo Ibérico). 13° Reunión Nacional de Geomorfología, Resúmenes CD, Cáceres.
- Vidal Romaní, J.R. 2008. Forms and structural fabric in granite rocks. *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 33: 175-198.
- Vidal Romaní, J.R. y Yepes Temiño, J. 2004. Historia de la morfogénesis granítica. *Caderno Lab. Xeolóxico de Laxe* 29: 331-360.
- Vidal Romaní, J.R., Bourne, J.A., Twidale, C.R. y Campbell, E.M. 2003. Siliceous cylindrical speleothems in granitoids in warm semiarid and humid climates. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 47(4): 417-437.
- Viers, G. 1983. *Geomorfología. Elementos de Geografía*. Oikos-tau, 205-215, Barcelona.
- Wray, R.A.L. y Sauro, F. 2017. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews* 171: 520-557.
- Zárate, M., Rabassa, J., Partridge, T. y Maud, R. 1995. La brecha Cerro Colorado (Abra de la Ventana, Buenos Aires): ¿es miocena? *Cuartas Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas* 1: 159-167, Junin.
- Zárate, M., Rabassa, J., Maud, R. y Partridge, T. 1998. La silicificación de la Brecha Cerro Colorado: clasificación, génesis e implicancias ambientales. *5° Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas* (1): 165-172.