



Caracterización micromorfológica, mineralógica y microbiológica de espeleotemas silíceos de la Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes (Buenos Aires, Argentina)

Silvia GRILL¹, M. Fernanda SORIA², Beatriz GUTIÉRREZ TÉLLEZ³ y Fernando LEBINSON¹

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

²Instituto Geológico del Sur, CONICET, Bahía Blanca.

³Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS). Bahía Blanca, Argentina.

Email: silviagrill@gmail.com

Editor: María Romina Onorato

Recibido: 6 de junio de 2023

Aceptado: 19 de septiembre de 2023

RESUMEN

El análisis micromorfológico, mineralógico y microbiológico de espeleotemas silíceos desarrollados en la Formación Brecha Cerro Colorado (Noroeste de las Sierras Australes), permitió efectuar un nuevo aporte sobre las condiciones ambientales y la génesis de estos depósitos. El origen de los espeleotemas planares, cilíndricos, concreciones y peloidales registrados se relacionaron con mecanismos generales y específicos que controlan la circulación del agua (gravedad, capilaridad, tensión superficial); condiciones microambientales (humedad relativa (HR), temperatura, evaporación e insolación) y actividad biológica. Las estructuras presentes en el interior de los tafoni se formaron bajo condiciones significativamente húmedas (HR > 60 %, condensación de vapor de agua, circulación lenta de agua), las cuales habrían favorecido la generación de espeleotemas planares y cilíndricos con espesores inferiores a 20 mm, texturas compactas y microcristales de yeso / calcita en sus extremos libres. En cambio, aquellos hallados en fracturas y en el exterior de los tafoni (ambientes significativamente menos húmedos) se vincularon con microformas más porosas (peloidales) y dimensiones más reducidas (< 5 mm de espesor). El análisis mineralógico permitió la identificación del ópalo – A, el cuarzo, la plagioclasa, illita, clorita y la hematita. El ópalo–A fue asociado al proceso de disolución / precipitación del cuarzo (llevado a cabo por el agua y la actividad biológica). Las arcillas proceden de la meteorización de los silicatos; la moscovita, clorita y las plagioclasas conforman la BCC (Venega et al. 2022). La presencia de hifas de hongos, líquenes y diatomeas (entre otros) permitieron inferir la participación biológica en el desarrollo de los espeleotemas. El escaso espesor de los mismos, la presencia de ópalo – A y las asociaciones polínicas registradas, acotarían su edad a tiempos recientes (Holoceno tardío?).

Palabras clave: Ópalo – A, microformas, BCC, Sierras Australes.

ABSTRACT

Micromorphological, mineralogical and microbiological characterization of siliceous speleothems from the Cerro Colorado Breccia, Sierras Australes (Buenos Aires, Argentina).

The micromorphological, mineralogical and microbiological analysis of silica speleothems developed in the Breccia Cerro Colorado Formation (Northwest of the Sierras Australes) allowed for a new contribution on the environmental conditions and genesis of these deposits. The origin of the planar, cylindrical, concretions and peloids speleothems investigated was related to general and specific mechanisms that control water circulation (gravity, capillarity, surface tension), microenvironmental conditions (relative humidity (RH), temperature, evaporation and insolation) and biological activity. The microforms present inside the tafoni formed under significant humidity conditions (RH > 60%, water steam condensation, slow water circulation) which would have favored the formation of planar

and cylindrical speleothems with thicknesses less than 20 mm, compact textures, and gypsum/calcite microcrystals at their free ends. On the other hand, those found in fractures and outside the tafoni (significantly less humid environments) were associated with more porous microforms (gours and peloids) and smaller dimensions (< 5 mm thickness). The mineralogical analysis allowed the identification of opal – A, Quartz, Plagioclase, Illite, Chlorite and Hematite. Opal-A was associated with the dissolution/precipitation process of quartz (linked to water and biological activity). Clays are the product of weathering of silicates and moscovite, chlorite, and plagioclases are part of the BCC (Venega et al. 2022). The presence of fungi, lichens, diatoms (among others) allowed for inferring biological mediation in the development of the speleothems. The low thickness of the speleothems, the presence of opal-A, and the recorded pollen associations limited their age to recent times (Late Holocene?).

Keywords: opal – A, microphorms, Breccia, Sierras Australes

INTRODUCCIÓN

En las Sierras Australes ubicadas en el suroeste de la provincia de Buenos Aires se encuentra la Formación Brecha Cerro Colorado (BCC, Andreis et al. 1971). En esta unidad se han registrado espeleotemas silíceos, en el interior de cavidades de tipo tafoni, planos de pseudo-estratificación y fracturas. Los mismos son la evidencia de la disolución y precipitación de sílice detrítica y autigénica en areniscas cuarzosas y cuarcitas (Wray 1999). Si bien estos han sido encontrados en varias cuevas de rocas ácidas alrededor del mundo (Wray y Sauro 2017), son frecuentes en áreas caracterizadas por altas precipitaciones anuales, principalmente a lo largo de los trópicos (p. ej., Brasil, Venezuela, Madagascar, Hawaii). También han sido definidos en ambientes geográfico-climáticos templado-húmedo (España, Portugal, Inglaterra, Alemania, Polonia, República Checa) y áridos (Australia, Argentina, Brasil, Nigeria, México, Estados Unidos) (Willems et al. 1998, 2002, Twidale y Vidal Romani 2005). Estos depósitos sedimentarios, a menudo conformados por ópalo amorfo (A) o formas criptocristalinas como la calcedonia (Hill y Forti 1997), exhiben una gran variedad de formas (planares, cilíndricas, entre otras). En general, son de dimensiones mili-centimétricas, aunque dentro del gran sistema de cuevas de Chimantá (Venezuela), se han encontrado formaciones silíceas que alcanzan hasta 1 m de desarrollo (Aubrecht et al. 2008, Sauro et al. 2013b). En Argentina, han sido hallados en el Batolito de Achala de la región central de la Sierra Grande de Córdoba, con dimensiones de pocos milímetros a 2 cm de espesor (Cioccale et al. 2008) y en la Brecha Cerro Colorado del norte de las Sierras Australes, alcanzando 4 cm de espesor (Grill et al. 2021). Su formación requiere de un sistema fisural y un flujo de agua muy lento para permitir, por una parte, la disolu-

ción-precipitación y por otra, la actividad de microorganismos (Sanjurjo et al. 2007). La circulación lenta de agua a lo largo de estas fisuras favorece la meteorización física-química de la roca. Estos procesos dependen de factores de carácter general (posición del nivel de base, gravedad, dimensiones de los conductos a través de los cuales circula el agua) y específicos tales como la capilaridad, tensión superficial o adherencia del agua a los conductos de la pared (Vidal Romaní et al. 2010).

El desarrollo de estas estructuras pétreas ocurre en lugares protegidos siendo infrecuente su registro en áreas expuestas (Cioccale et al. 2008). Por otra parte, algunos autores (Wray 1999, entre otros) consideran que en la formación de los espeleotemas silíceos son más importantes las condiciones microambientales que las condiciones climáticas regionales. En relación a esto y con la finalidad de evaluar el microclima donde se forman espeleotemas silíceos en la BCC, Soria et al. (2022) registraron la humedad relativa y la temperatura utilizando dos *data loggers* (EL-USB-2) durante un año (abril/2021 – abril/2022). Estos sensores instalados en el interior y exterior del tafone situado en la ladera suroeste del cerro A (Fig. 1b) permitieron determinar que las condiciones templadas (14° - 25°C) y humedades relativas superiores al 60% favorecen la generación de espeleotemas.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar los sistemas geobiológicos desarrollados en diferentes sitios: tafoni y estructuras geológicas (fracturas, planos de pseudo-estratificación) de la BCC (sector norte de las Sierras Australes, Fig. 1a), a partir de un estudio multi-proxy. El mismo incluye el análisis micromorfológico, mineralógico y microbiológico (esporomorfos, diatomeas, fitolitos y cistos silíceos) de los espeleotemas silíceos identificados. A su vez, se aportarán nuevos datos microambientales conducentes a dilucidar la génesis de estas microformas.

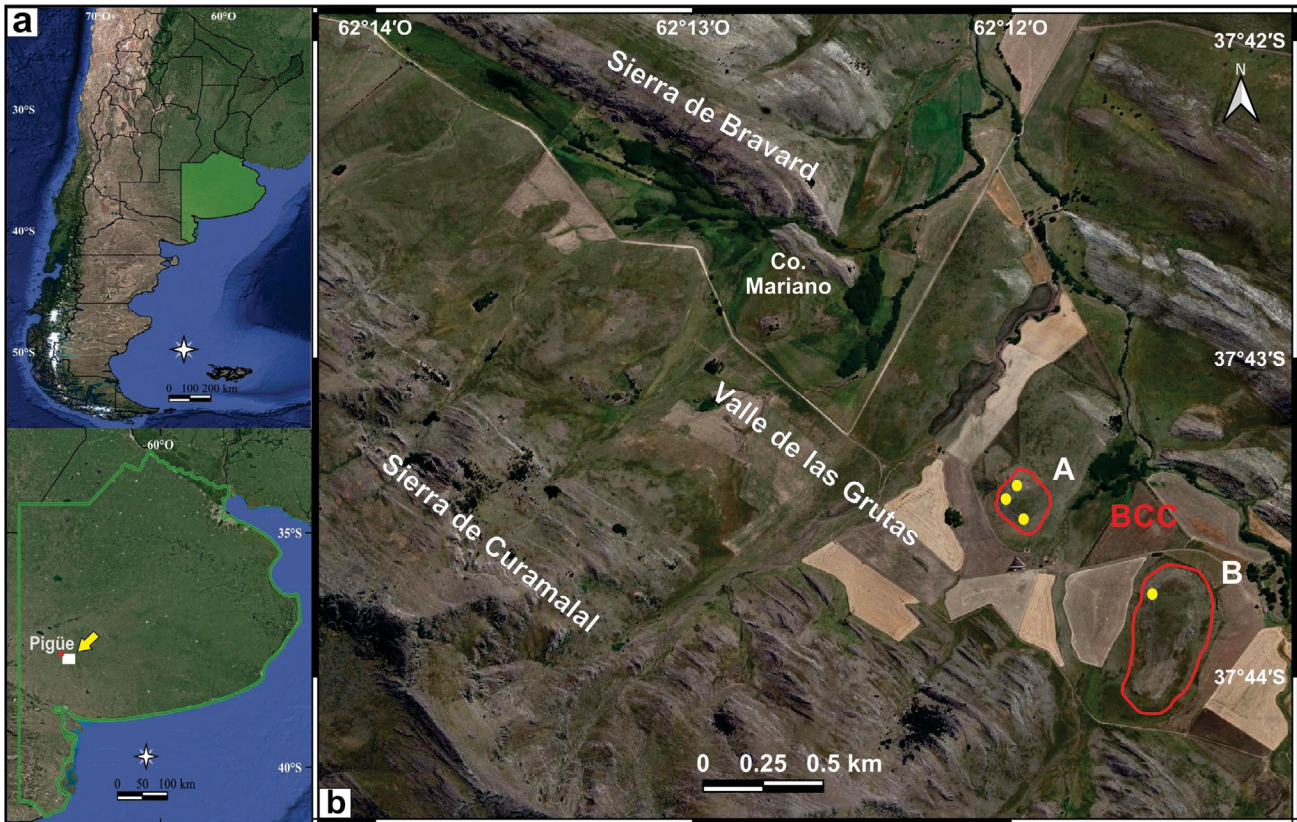


Figura 1. a) Mapa de ubicación del área de trabajo; b) Se destacan los cerros A y B estudiados y los puntos de muestreo.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA

Aspectos geológicos y geomorfológicos del sector norte de las Sierras Australes

Las Sierras Australes (provincia de Buenos Aires) están constituidas en el extremo noroccidental por dos cordones subparalelos, Curamalal (al suroeste) y Bravard (al noreste) separados por el Valle de Las Grutas. En ellos afloran los grupos Curamalal y Ventana conformados por metaconglomerados, cuarcitas y filitas de edad silúrico-devónica (Sellés-Martínez 2001). En discordancia angular sobre las unidades paleozoicas se encuentra la Brecha Cerro Colorado (Andreis et al. 1971) adjudicada tradicionalmente al Mioceno (Harrington 1947). La misma forma parte de una antigua superficie de erosión, asignada al Cenozoico tardío (Keidel 1916, entre otros) y con posterioridad al Paleoceno (Rabassa et al. 1995). Actualmente estos depósitos, dispuestos a lo largo de 60 km, que afloran entre los cordones serranos de Curamalal y Bravard, conforman cerros aislados con orientación SO-NE y alturas variables entre 420 y 490 m s.n.m. En este paisaje, en el cual los procesos erosivos han jugado un rol muy importante, al menos desde el Cretácico Tardío (Rabassa et al.

1995), se distinguen algunos procesos agradativos de distintas dimensiones. Entre ellos, la acumulación de sedimentos eólicos, fluviales y regolitos, en los sectores más bajos del valle y del piedemonte serrano, así como pequeñas formas acumulativas en la BCC. Estas últimas conforman espeleotemas silíceos, parte de ellos son estudiados en el presente trabajo.

Petrografía, sedimentología y micromorfología de la Brecha Cerro Colorado

La BCC, con espesores variables entre 16 y 29 m, se dispone en bancos horizontales a subhorizontales y base cubierta en algunos sectores. No existe una estratificación marcada, en consecuencia, se habla de una pseudo – estratificación (Antonoli 1970). Hacia el suroeste del área de estudio, los bancos se acufian hasta desaparecer, dejando al descubierto las cuarcitas y filitas de la Formación Hinojo (Grupo Curamalal), sobre esta última, se dispone la BCC.

Los estudios macroscópicos permitieron clasificar a la BCC como una brecha areno-fangosa con cemento ferruginoso (Venega et al. 2022a). La fracción grava está compuesta por fragmentos líticos de cuarcitas blancas y rosadas junto a filitas cuarzosas rosadas. La matriz areno-fangosa está constituida por clastos de cuarcitas, filitas, feldespatos, cristales de cuarzo detrítico y minerales de arcilla (alunita entre ellas).

El cemento es de dos tipos, uno silíceo (compuesto principalmente por ópalo) y otro ferruginoso (hematítico) que le otorga el típico color rojo a esta unidad (Venega et al. 2022a).

El análisis microscópico reveló la presencia de clastos líticos de cuarcitas, cuarcitas micáceas y filitas, junto con cristaloclastos de cuarzo, minerales opacos, feldespatos y turmalina. En general, los clastos subangulosos a subredondeados y los fragmentos líticos, se presentaron frescos, parcialmente sericitizados o con impregnaciones de óxidos de hierro de color rojo oscuro dispuestos en los contactos intergranulares. En los niveles superiores de la BCC, se observaron clastos de cuarzo con textura de runicuarzo i.e. con poros de disolución rellenos con óxidos de hierro y minerales de arcilla. La coexistencia de estos granos con otros sin figuras de disolución, sugiere para los primeros procesos de meteorización previa a su depositación. La fracción fina compuesta por minerales de arcilla teñidos por óxidos de hierro, le otorgan la coloración rojiza a anaranjada (Venega et al. 2022b).

La asociación de minerales (registrada mediante difracción de Rayos X) compuesta por illita, caolinita y hematita, se manifestó en los poros como revestimientos de arcillas y rellenos densos masivos o laminados (Venega et al. 2022a). La presencia de arcillas límpidas no laminadas y laminadas de colores diversos (rojizos, anaranjados y amarillentos) y revestimientos de arcillas límpidas alternando con arcillas impuras y pulverulentas, se relacionó con un origen edáfico (Venega et al. 2022b).

Clima, fitogeografía y vegetación

Las Sierras Australes ubicadas dentro de la faja de los climas templados de la Tierra, presentan un clima húmedo sub-húmedo, mesotermal con pequeño a nulo déficit de agua (*sensu* Thornthwaite en Burgos y Vidal 1951). En la Estación Pigüé, según el Servicio Meteorológico Nacional (período 1981 – 2021), la temperatura media anual fue de 14°C y las precipitaciones medias anuales de 803.7 mm.

En relación a la circulación general de los vientos, las masas de aire con dirección NE-SW son predominantes en la provincia. También la afectan masas de aire frío subantártico provenientes desde el SW y masas de aire cálido provenientes desde el Norte (Burgos 1968).

De acuerdo a Cabrera (1976) las Sierras Australes pertenecen a la provincia Pampeana (Distrito Pampeano Austral), cuya vegetación predominante es la estepa de gramíneas (poáceas).

En las Sierras Australes los afloramientos de roca firme -roquedales- y los materiales sueltos edafizados de fisuras, grietas y cuevas, son ocupados por vegetación saxícola o casmofítica (Frangi y Bottino 1995). La misma está domina-

da por distintas especies de la familia Poaceae y en menor proporción por Asteraceae (*Grindelia chilensis*), Plantaginaceae (*Plantago bismarki*) y Mimosoideae (*Mimosa rocae*), asociadas a “helechos” (*Cheilanthes*, *Polystichum*, *Anemia*, *Notholaena*, *Polypodium*, entre otros).

Las distintas comunidades vegetales varían de acuerdo a la pendiente de los roquedales, su altura y exposición a la radiación solar. A su vez, el tipo e intensidad de agrietamiento genera distintos micrositos, los cuales presentan diferentes espesores, capacidad de retención del agua, radiación recibida, etc. La combinación de las características mencionadas con las distintas altitudes en el paisaje serrano, generan roquedales distintos y en consecuencia comunidades vegetales disímiles (Frangi y Bottino 1995).

METODOLOGÍA

Las tareas de campo consistieron en la identificación y georreferenciación de los tafoni, planos de pseudo-estratificación y las fracturas con espeleotemas silíceos en dos afloramientos de la BCC (Fig. 1b). Considerando el desarrollo vertical (espesor) y horizontal de los espeleotemas se tomaron nueve muestras correspondientes a diferentes sitios: pared, fondo, techo y piso de tafoni y fracturas.

En la figura 2 se muestran los cerros A y B estudiados. En el cerro A, los espeleotemas muestreados fueron tomados de un tafone ubicado en la ladera suroeste (A1: pared interna, A2: techo, A3: fondo, A4: pared externa) y de tres tafoni (A6: techo, A7: techo, A8: piso) y una fractura vertical (A5) de la ladera noroeste. En el cerro B, fueron muestreados los espeleotemas de un tafone de la ladera noroeste (B1: techo).

Las tareas de gabinete contemplaron los análisis micromorfológicos, mineralógicos y micropaleontológicos (palinomorfos, diatomeas, fitolitos y cistos silíceos). Las descripciones micromorfológicas del ópalo se llevaron a cabo con un estereomicroscopio (Leica 200), siguiendo las nomenclaturas de Wray (1999), Aubrecht et al. (2008) y López Galindo y Vidal Romaní (2013). También se consideró a Hill y Forti (1995), quienes clasifican a los espeleotemas en base a su morfología y génesis y establecen los criterios para diferenciarlos en *tipo*, *subtipo* y *variedades*. En consecuencia, los espeleotemas fueron definidos en función de su morfología, que es controlada por uno o más mecanismos hidrogeológicos (goteo, flujo, capilaridad, condensación de vapor de agua, agua en aerosol). Con el mismo instrumento óptico se visualizaron en detalle líquenes, mudas de artrópodos (ácaros y colémbolos) e hifas de hongos.

La mineralogía de los espeleotemas fue definida median-

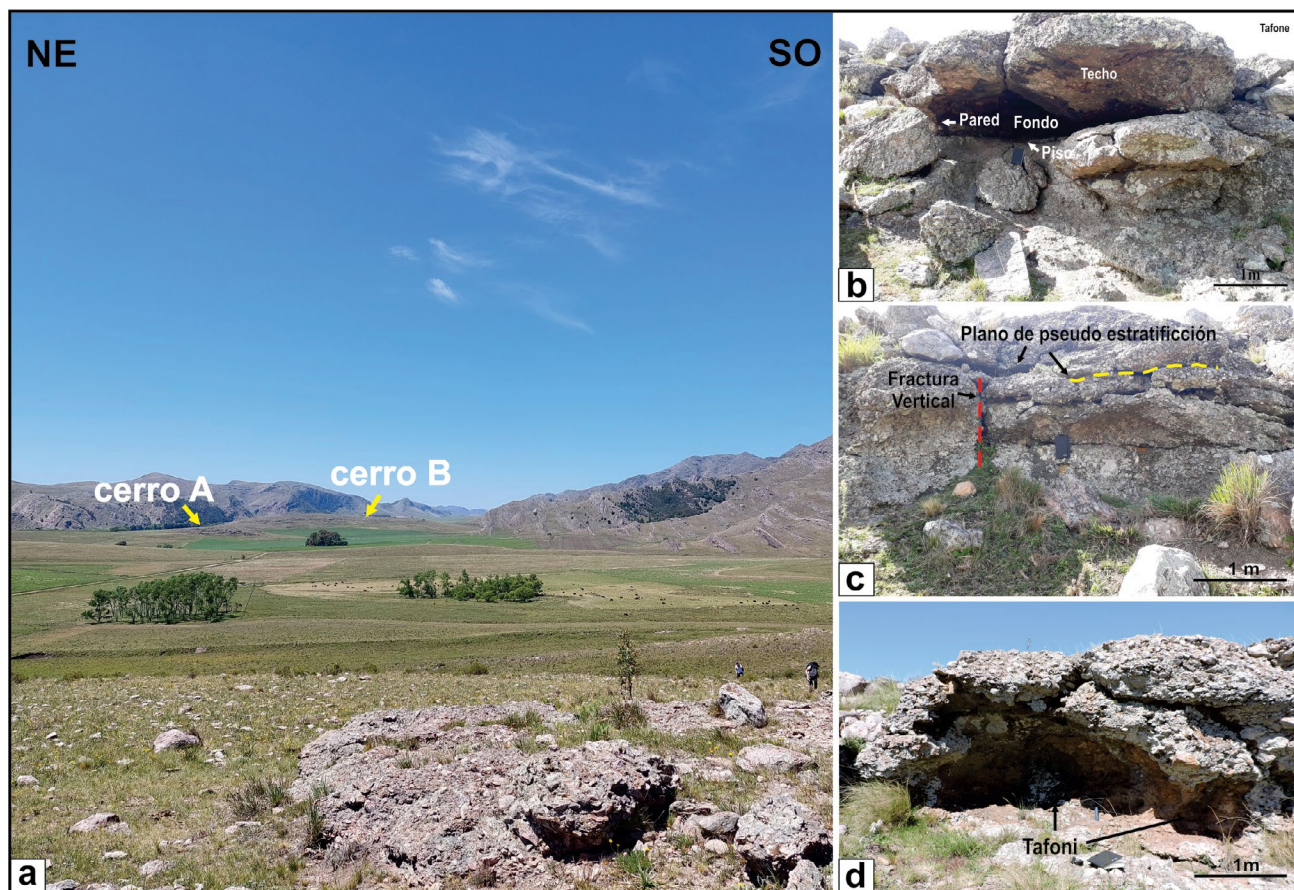


Figura 2. a) Afloramientos de la Brecha Cerro Colorado estudiados: cerros A y B; b) tafone de la ladera suroeste del cerro A dónde se efectuó el estudio microclimático (Soria et al. 2022). A su vez, se señalan sus partes: techo, piso, pared, fondo; c) Se destacan las fracturas verticales y los planos de pseudo-estratificación característicos de la BCC; d) tafoni del cerro B.

te el método de difracción de polvo de rayos X (DRX, Bish y Post 1988). Los patrones de DRX fueron registrados con un difractor Rigaku D-Max III – C (condiciones experimentales 35Kv y 15 mA, con radiación de Cu $K\alpha$ $\lambda = 1.54059$ y monocromador de grafito en el haz difractado) en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología (U.N.S)

La concentración de los palinomorfos (granos de polen, esporas de Pteridophytas, Bryophytas, hongos y algas) se efectuó de acuerdo a las técnicas de Heusser y Stock (1984) y Noetinger et al. (2017) en el Laboratorio de Palinología del INGEOSUR (U.N.S). Previo al tratamiento físico-químico se incorporaron, en cada una de las muestras, cuyo peso osciló entre 5 – 35 gr, una tableta con 20848 esporas de polen foráneo (*Lycopodium* sp.). El análisis microbiológico se realizó con un microscopio óptico Olympus CH30 con cámara digital Celestron HD digital incorporada, portadora de una lente de aumento 30x integrada. Se realizaron recuentos de 200 granos de polen por muestra, el resto de los palinomorfos (esporas de hongos, algas, bryophytas y pteridophytas) se contaron fuera de estos recuentos. A partir de estos datos, se calcularon las frecuencias relativas de cada taxón

polínico respecto del total de granos de polen y esporas de pteridophytas, y de granos de polen y esporas respecto del total de esporomorfos. El agregado de polen foráneo permitió calcular la concentración polínica absoluta (c.p.a) de cada muestra (granos / gramos de ópalo). Las asignaciones taxonómicas de esporomorfos se efectuaron siguiendo a Heusser (1971), Reille (1992), Prieto y Quattrocchio (1993), Van Geel et al. (1983), entre otros.

Las muestras de diatomeas y cistos se trataron siguiendo métodos estándar (Battarbee 1986, Noetinger et al. 2017). La abundancia relativa del número de valvas de diatomeas fue realizada siguiendo la categorización modificada de Ehrlich (1973): ausentes, raras (1 – 2, cada 10 campos), escasas (1 – 10, cada 10 campos), frecuentes (10 – 50, cada 10 campos) y abundantes (50 – 100, cada 10 campos). En el caso de los cistos y fitolitos se consideró presencia/ausencia. Para la clasificación taxonómica de diatomeas se consultó el sistema de Round et al. (1990). La identificación de los géneros y especies se basó en Krammer y Lange-Bertalot (1986, 1988 y 1991) y Germain (1981). Para los cistos de Chrysophytas se consultó el Atlas de quistes de Chrysophyceae, volumen

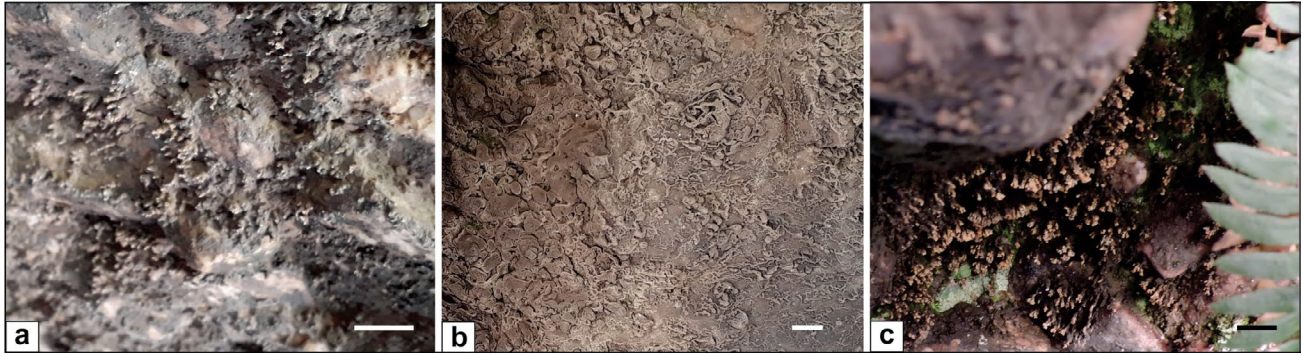


Figura 3. Micromorfologías del ópalo *in situ*: a) cilíndricos de techo (estalactitas); b) planares (*gours*) y peloides (pared externa de tafone); c) cilíndricos de techo (estalactitas) en cuyos extremos se visualiza en forma de flor o coliflor, el penacho del espeleotema (microcristales de yeso). Escala: 1 cm.

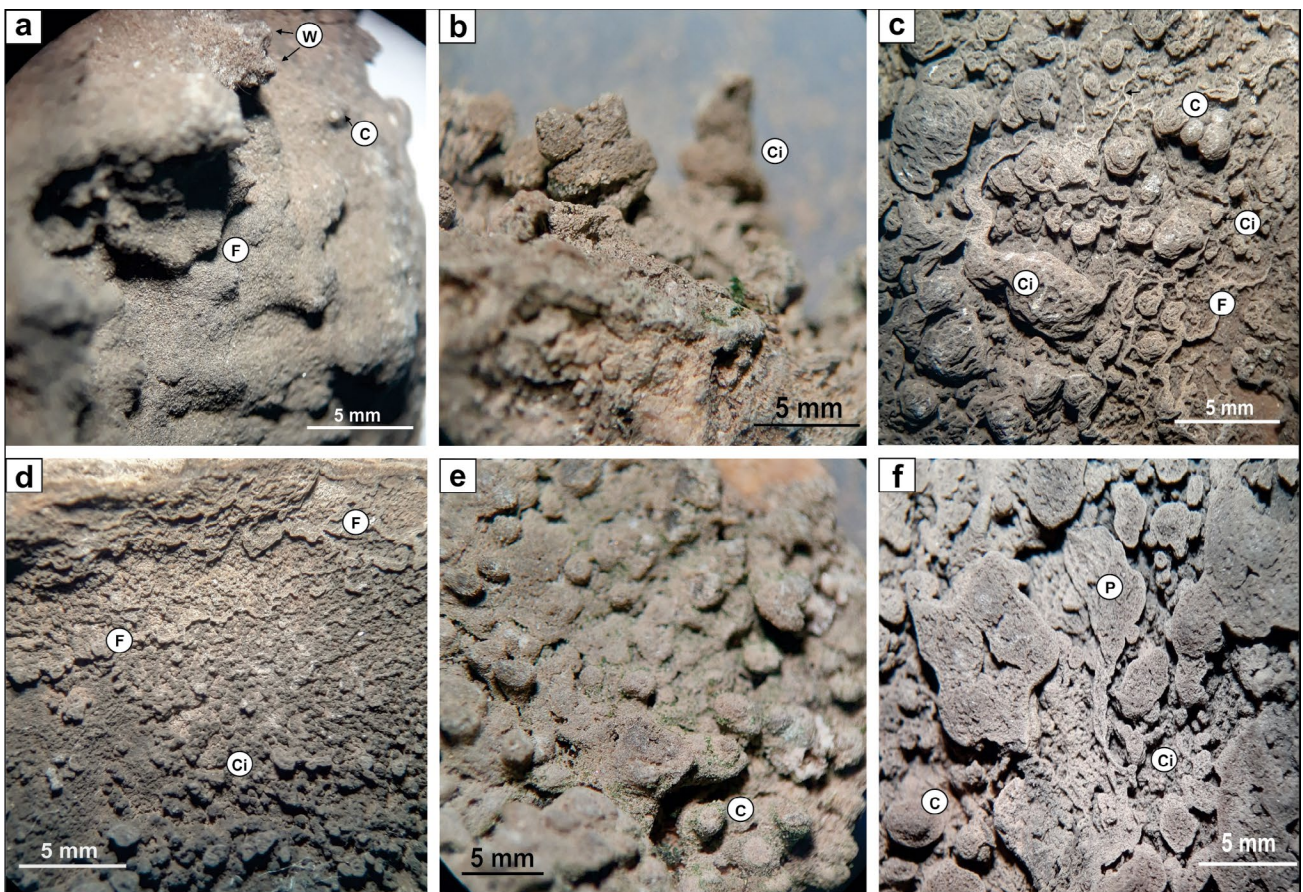


Figura 4. Fotografías tomadas bajo estereomicroscopio, donde se visualizan los espeleotemas silíceos reconocidos. Abreviaturas empleadas: F: flowstones; Ci: cilíndricos; C: concreciones; W: whiskers o microcristales de yeso; P: Peloidales.

2 (2001). Los fitolitos fueron clasificados morfológicamente (Twiss 1969).

RESULTADOS

Micromorfologías del ópalo

En el interior y exterior de los tafoni las formas de los espeleotemas son ampliamente variables y sus dimensiones son inferiores a los 20 mm de espesor (Fig. 3). Por tal motivo,

se decidió resumir la nomenclatura en cuatro categorías: planares, cilíndricos, concreciones y peloidales.

Dentro de la categoría de espeleotemas “planares”, se agruparon a las estructuras de flujo o laminares: *flowstones*, *gours*, tabicadas (Vidal Romani y López Galindo 2013), que tapizan la superficie de la roca (< 2 mm – 4 mm de espesor) (Fig. 4 a, c y d). Las formas pétreas similares a las estalactitas y estalagmitas calcáreas fueron reunidas en la categoría de “cilíndricos” (Fig. 4b). Su crecimiento es perpendicular a la superficie (techo, pared, piso) y pueden ocurrir individualmente



Figura 5. Evidencias de organismos: a) Hifas de hongos; b) Muda de artrópodo; c) Líquenes

(cónicas, *mushroom*) o en grupos (coralinas, *popcorn*). Son de textura moderadamente porosa, de diámetros inferiores a los 3 mm y de 2 mm de espesor.

Los espeleotemas de apariencia hemisférica y de textura compacta se agruparon en la categoría de “concreciones” (Fig. 4c y e). Los mismos se presentan de manera individual (oolitas, Grill et al. 2021) o grupal (botroidal (Aubrecht et al. 2018), *popcorn* (Wray 1999)) y sus diámetros son variables (1 – 4 mm). Dentro de la categoría “peloidales” se consideraron a todas las estructuras ovoidales y/o amorfas, de textura muy porosa (Fig. 4f). En el presente trabajo se define una morfología en estrella, que podría ser el resultado de la unión de cinco formas ovoidales o cilíndricas muy porosas (brazos de

3 – 4 mm de longitud y espesor < 3 mm, Fig. 4f).

Asociado a estas morfologías se observaron en detalle líquenes de diferentes tonalidades (blanquecinas, grises, verdes), hifas de hongos y mudas de artrópodos (ácaros, colémbolos) (Fig.5).

Mineralogía

Por difracción de rayos X fueron determinadas las especies cristalinas y no cristalinas presentes en los espeleotemas: ópalo – A, cuarzo, illita, caolinita, moscovita, plagioclasas, clorita y hematita. En la figura 6 se muestran los difractogramas obtenidos de las muestras A1, A7 y B1 con las abreviaturas correspondientes (Whitney y Evans 2010).

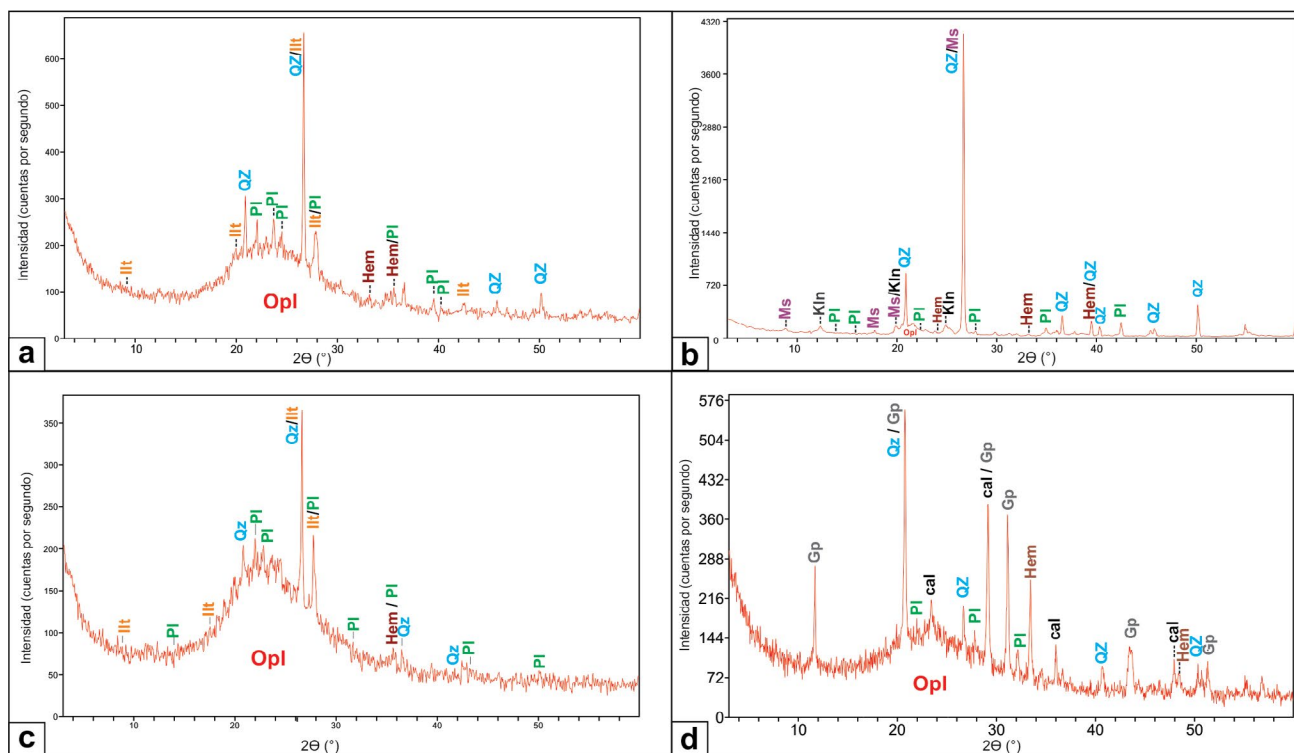


Figura 6. Difractogramas de las muestras de espeleotemas correspondientes a los cerros A (a-c) y B (d) con las abreviaturas correspondientes: Opl (ópalo), Qz (Cuarzo), Ill (Illita), Pl (plagioclasa), Ms (moscovita), Hem (hematita), Kln (Caolinita), Gp (Yeso), Cal (calcita). a) muestra A1, b) muestra A7, c) muestra B1 y d) Muestra anexo de yeso y calcita.

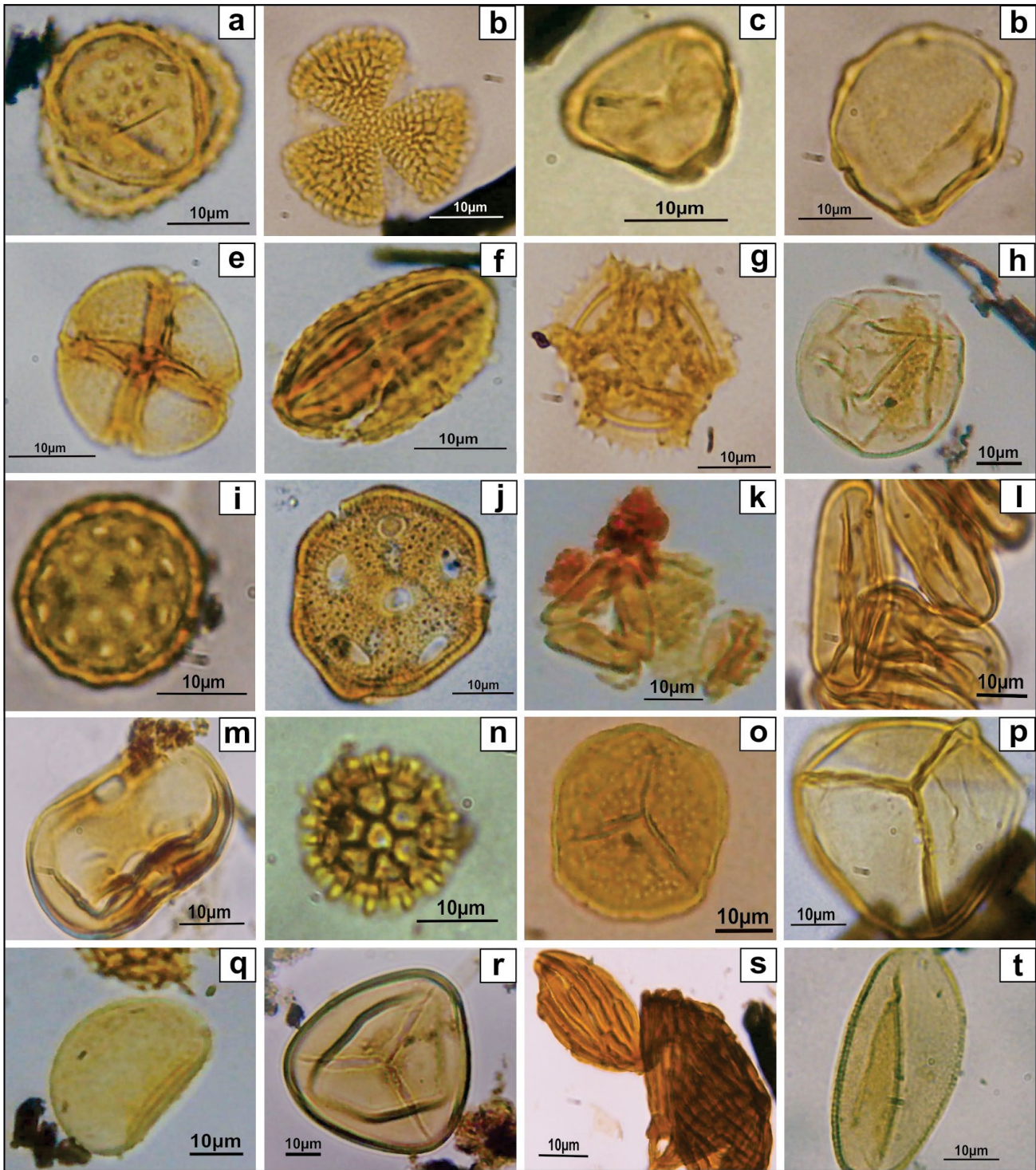


Figura 7. Esporomorfos reconocidos en los espeleotemas de la BCC. a-n) Granos de Polen: a) Asteraceae (*Ambrosia* sp.); b) Nothofagaceae (*Nothofagus* sp.); c) Myrthaceae; d) Brassicaceae (*Diplotaxis* sp.); e) Fabaceae (Subfamilia Mimosoideae: *Mimosa rocae*, Lorentz & Niederer); f) Asteraceae; g) Asteraceae (*Lactuca* sp.); h) Poaceae; i) Chenopodiaceae; j) Caryophyllaceae; k) Rhamnaceae (*Discaria* sp.); l) Apiaceae; m) Fabaceae (Subfamilia Papilionoideae); n) Amaranthaceae (*Gomphrena* sp.); o-p) esporas de *Bryophytas*: o) *Phaeoceros* sp. (ornamentada); p) *Phaeoceros* sp. (lisa); q-s) esporas de Pteridophytas: q) *Polypodium* sp.; r) *Cheilantes* sp.; s) *Anemia* sp.; t) espora de Zygnemataceae (algas): *Spirogyra* sp.

El ópalo se registra en todas las muestras, entre los 19° - 32° 2θ, distinguiéndose por su forma de campana. El resto de los minerales se reconocieron por los picos característicos definidos en las fichas del "International Centre For Diffraction

Data" (ICDD). En otras muestras de espeleotemas de la BCC (no incluidas en este trabajo) se reconocieron yeso y calcita (Fig. 6d).

Micropaleontología

El análisis micropaleontológico bajo microscopio óptico, permitió identificar en los espeleotemas, palinomorfos (granos de polen, esporas de pteridophytas, bryophytas (musgos y líquenes), algas y hongos), diatomeas, cistos silíceos y fitolitos. En este estudio las muestras fueron agrupadas de acuerdo a su distribución en tafoni y fracturas. De esta manera, del promedio de las frecuencias relativas de los esporomorfos reconocidos en las ocho muestras de tafoni (A1, A2, A3, A4, A6, A7, A8, B1), resulta que los “granos de polen + esporas de pteridophytas” representan el 79 %, las esporas de bryophytas inferiores a 2 %, hongos el 7 % y algas el 12 % (Fig. 7 a-n). En la asociación polínica predominan granos de polen pertenecientes a: Poaceae (39 %) y Asteraceae (21.5 %), asociados a Chenopodiaceae – Amaranthaceae (6 %), Apiaceae (2 %) y Brassicaceae (3 %). Dentro de las fabales se hallan las subfamilias Papilionoideae (6.5 %) y Mimosoideae (< 1 %). En porcentajes inferiores al 2 % se encuentran Convolvulaceae, Caryophyllaceae y Anacardiaceae. El polen de plantas acuáticas (≤ 4 %) está representado por: Cyperaceae, Juncaceae y Potamogetonaceae. El polen arbóreo comprende a: Podocarpaceae (< 2 %), Myrthaceae (< 1 %) y Nothofagaceae (< 2 %). El 5.5% del espectro polínico corresponde a granos indeterminados.

En la muestra procedente de la fractura vertical (A5) los “granos de polen + esporas de pteridophytas” constituyen el 65.1 %, las esporas de bryophytas el 0.3 %, hongos el 27.1 % y algas el 7.5 %. La asociación polínica es congruente a la definida en tafoni por más que varíen las concentraciones relativas: Poaceae (40 %) y Asteraceae (27 %), Chenopodiaceae – Amaranthaceae (5 %), Apiaceae (2 %) y Brassicaceae (3 %). También se encuentran fabales (subfamilia Papilionoi-

deae (3 %) y Mimosoideae (< 1%)), Convolvulaceae (< 2 %), Caryophyllaceae (< 2 %) y Anacardiaceae (1 %). El polen de plantas acuáticas (< 1 %) está conformado por: Cyperaceae, Juncaceae y Potamogetonaceae. El polen arbóreo está representado únicamente por Nothofagaceae (6.5 %). El 2 % del espectro polínico son granos indeterminados.

La concentración polínica absoluta (c.p.a) promedio (Cuadro 1) de las ocho muestras de espeleotemas de tafoni fue de 55106 granos de polen/gramo de ópalo, registrándose concentraciones elevadas en las muestras A1 (34747 granos de polen/ gramo de ópalo) y B1 (361093 granos de polen/ gramo de ópalo). La c.p.a de la muestra de la fractura vertical fue de 2120 granos de polen/gramo de ópalo.

Con respecto al resto de los palinomorfos las pteridophytas (Fig. 7 q-s) están representadas por: *Elaphoglossum* sp., *Asplenium* sp., *Blechnum* sp., *Cheilantes* sp., *Polystichum* sp., *Polipodium* sp., *Vittaria* sp., *Adiantum* sp. y *Anemia* sp, entre otras. Las *Bryophytas* (Fig.6 o-p) por: *Phaeoceros* sp. (ornamentadas y lisas); las esporas de hongos se asociaron a: acoesporas tipo 2, tipo 55A1(*Gelasinospora* cf. *Reticulispora*), 124, 128, tipo 324 y 368, entre otras (Van Geel et. al 1983). En las muestras A6, A7, A8 se reconocieron hifas de hongos. Para concluir, las esporas de algas fueron asignadas a: *Spirogyra* sp., *Mougeotia* sp., *Zygnema* sp., tipo 128, 137(*Ceratopyllum* sp), 304, 369 (Van Geel et. al 1983).

En relación al contenido diatomológico fueron identificados a diez taxa, junto con morfotipos lisos y ornamentados de Cistos de Chrysophytas y fitolitos, bilobulados y truncados (Fig.8). La abundancia máxima de diatomeas se registró en la muestra B1 (40 valvas). Dentro de las ocho muestras de tafoni: las diatomeas estuvieron ausentes en A7, raras en A1 y A4, escasas en A2 y frecuentes en A3, A6, A8 y B1. En la muestra de fractura (A5) estuvieron ausentes. Las especies

Cuadro 1. Frecuencias relativas de esporomorfos y la concentración polínica absoluta de cada sitio muestreado

Muestra	Sitios	Espeleotemas	P + Pte (%)	Algas (%)	Hongos (%)	Bry (%)	Concentración Polínica absoluta	
A1	Pi	F, Ci y C	85.7	4.9	8.7	0.7	34747	
A2	T	F y Ci	90.7	6	2.9	0.7	4485	
A3	Pi	F, Ci y C	82.9	4	10.5	2.4	6781	
A4	Pe	F y Ci	84.2	9.1	2.2	3	12116	
A6	T	F y Ci	76.1	17	5.7	1.3	6675	
A7	T	F, Ci y C	76.5	11	11.9	1.3	2673	
A8	Ps	F	50.4	42.5	5	2.04	9556	
B1	T	Ci	88.9	2	9.2	0	363818	
A5	Fractura	Pe	F	65.1	7.5	27.1	0.3	2120

Abreviaturas correspondientes a los palinómorfos, P + Pte: “Granos de Polen + Pteridophyta”, Bry: Bryophytas. Abreviaturas de las categorías de espeleotemas, F: espeleotemas planares, Ci: espeleotemas cilíndricos, C: concreciones. Abreviaturas de los sitios, Pi: pared interior, Pe: pared exterior, Ps: piso, T: techo.

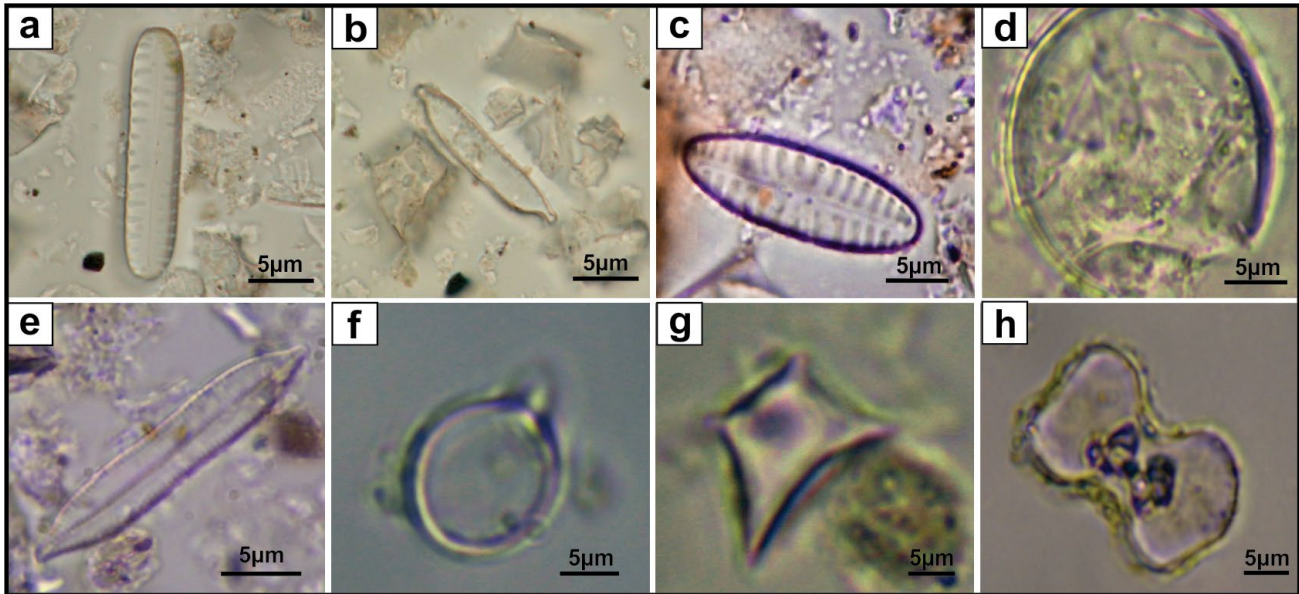


Figura 8. Diatomeas. a) *Pinnularia borealis* Ehrenberg; b) *Hantzschia amphioxys* (Ehr.) Grunow; c) *Luticula goeppertiana* (Bleish) D.G. Mann; d) *Stephanodiscus neoastraea* Håkansson and Hickel; e) *Nitzschia* sp.; f) Cisto; g) Fitolito truncado; h) Fitolito bilobulado.

más representativas fueron *Hantzschia amphioxys* (Ehr.) Grunow y *Pinnularia borealis* Ehrenberg. A su vez se encuentran: *Nitzschia* sp., *Eunotia exigua* (Bréb. in Kütz.) Rabenhorst, *Stephanodiscus neoastraea*? Håkansson y Hickel, *Luticula goeppertiana* (Bleish) D.G. Mann, *Lemnicola* sp. Round y Basson y *Melosira varians* Agardh.

DISCUSIONES

Micromorfologías y génesis

Los primeros trabajos sobre depósitos secundarios de sílice amorfa hidratada (efectuados en cuevas y cavernas de rocas ácidas, Caldcleugh 1826), consideraban un origen netamente químico, asociado a procesos de disolución – precipitación. Estudios posteriores demostraron la participación de la actividad biológica, desarrollada por bacterias (Kuznetsov, S.I. 1975, Saavedra y Sánchez 1981). Actualmente, estos últimos son denominados bioespeleotemas y se los asocia con bacterias heterotróficas o cianobacterias (Vidal Romaní et al. 1998, 2003, 2010, Vidal Romaní y Sanjurjo Sánchez 2005, Aubrecht et al. 2008, López Galindo y Vidal Romaní 2013, entre otros). Estudios preliminares con microscopio electrónico de barrido (MEB), en muestras de espeleotemas de la BCC, han permitido identificar la presencia de cianobacterias y bacterias (Soria, en realización).

En relación a la génesis de los espeleotemas estudiados en el presente trabajo, las estructuras planares (*flowstones*, *gours* y tabicadas) halladas particularmente en el interior de

los tafoni (piso, pared, techo), se les adjudica un origen netamente químico asociado a la circulación o flujo de agua (Wray 1999). Los *gours* y las tabicadas, a su vez, observados en el exterior de los tafoni (paredes y fracturas), también podrían generarse por capilaridad, adherencia y exudación (López Galindo 2013).

Las estructuras cilíndricas (estalactitas, estalagmitas, cónicas, *mushroom*, coralinas), ubicadas en el techo de los tafoni y en la parte superior de las fisuras, se formarían a partir del goteo del hidrogel de silicio y su circulación lateral a lo largo del espeleotema (modificado de Hill y Forti 1995). Mientras que las reconocidas en el piso (planos de pseudo-estratificación y las partes inferiores de las fracturas) podrían originarse a partir de procesos de capilaridad y exudación desde su base (López Galindo 2013). En el caso de la morfología en estrella (Fig. 4f), encontrada en la fractura vertical del cerro A (Fig.2a), probablemente sea el resultado de la unión de formas cilíndricas y procesos de flujo del hidrogel de silicio.

Considerando los organismos hallados sobre los espeleotemas planares y cilíndricos, y las cianobacterias y bacterias identificadas recientemente con microscopio electrónico de barrido (MEB) (en muestras de espeleotemas de la BCC) (Soria, en realización) se puede proponer una interrelación entre los procesos físicos del agua (gravedad, capilaridad, flujo) y los microorganismos productores y consumidores que colonizan el microecosistema (cianobacterias y bacterias).

Por otra parte, el origen de los espeleotemas peloidales (ovoidal, irregular, *kidney*), reconocidos en el interior y exterior de los tafoni (planos de pseudo – estratificación, paredes

y fracturas) estaría sujeto a la participación de bacterias (oxidantes de sulfuros o nitrificantes) y cianobacterias (Aubrecht et al. 2008, Vidal Romani et al. 2015, Kulkarni et al. 2022), identificadas en otros espeleotemas de la BCC (Grill et al. en realización).

En cambio, las concreciones, encontradas en el interior de los tafoni (planos de pseudo – estratificación y piso) se formarían a partir de la presencia de pequeños núcleos de acreción (fragmentos de roca o espeleotemas, huevos o restos de microorganismos) (Grill et al. 2022, López Galindo 2013).

En cuanto al penacho del espeleotema reconocido en forma de pequeños cristales de yeso y calcita en los extremos libres de los espeleotemas cilíndricos y de los flowstones (interior de las cavidades) estaría revelando el estadio final de formación del mismo (Vidal Romani et al. 2010, López Galindo y Vidal Romani 2013).

Esta diversidad morfológica (forma, textura, dimensiones) hallada en los sitios estudiados ha sido atribuida a cambios microambientales de húmedo a seco y a la incipiente actividad biológica (Aubrecht et al. 2008, Vidal Romani et al. 2015, entre otros). Así, la presencia en el interior de los tafoni de espeleotemas planares, cilíndricos, concreciones y peloidales, con texturas compactas y dimensiones entre 2 a 20 mm de espesor estarían revelando condiciones ambientales significativamente húmedas (HR > 60%, condensación de vapor de agua, flujo de agua) (Cuadro 2) y mayor tiempo de formación

(Sanjurjo y Vidal Romani 2011), en relación a los desarrollados en el exterior y en las fracturas. En estas, las formas son más porosas y de dimensiones inferiores a los 5 mm de espesor (planares y peloides), denotando ambientes significativamente menos húmedos (HR ≤ 60%) y poco favorables para un buen crecimiento del espeleotema.

Mineralogía

Con respecto a la mineralogía de los espeleotemas de la BCC y concretamente a la presencia del ópalo – A, se asume esta variedad dado que en la serie de transformación diagenética, es la primera en formarse sobre la superficie terrestre (Moore 1997). Las pequeñas dimensiones de los espeleotemas silíceos analizados también permiten sostener esta afirmación.

En relación a su proveniencia y considerando que el ópalo es un mineraloide hidratado, originado a partir de la liberación del silicio (Si) en las aguas vadasas (Siever 1962), se lo podría vincular directamente con la disolución del cuarzo (Vidal Romani et al. 2010), aunque el mismo también podría ser liberado de los silicatos. Es sabido que, estos últimos se tornan más solubles ante la acción de ácidos orgánicos producidos por algunas bacterias (Konhauser 2016). Por ejemplo, el ácido cítrico libera el Si de las plagioclasas (Silverman y Muñoz 1970) y el ácido glucónico asimismo de la albita, la caolinita y el cuarzo a pH neutro (Vandevivere et al. 1994).

Cuadro 2. Resumen de las variables climáticas características de cada sitio

Sitios	Espeleotemas	Concentración Polínica Absoluta	Tem. (°C)	Hum. Rel (%)	Prec. (mm)	Mecanismos Hidrológicos
TAFONI INTERIOR	Pared	Planares			1135 mm anuales (*)	
		Mushroom				
	Peloidales	A1: 34747 A3: 6781				
	Piso	Planares	A8: 9556	Max: 34.5° Min: 1.5° Rango: 33° Media: 14.9°		
Techo	Cilíndricos	A2: 4485 A6: 6675 A7: 2673 B1: 363818			-Evaporación menor que en el exterior	
	Pared	Cilíndricos				
		Gours				
FRACTURA EXTERIOR	Pared	Planares	Max: 39.5° Min: 1° Rango: 38.5° Media: 15.5°	Max: 100 Min: 15.5 Rango: 88 Media: 53		-Condensación de vapor de agua -Capilaridad -Evaporación mayor que en el interior
		Peloidales	A4: 12116			
FRACTURA EXTERIOR	Pared	Peloidales	Max: 30° Min: 3° Rango: 27.4° Media: 14.5° (*)	Max: 99 Min: 13.6 Rango: 86 Media: 72 (*)		-Condensación de vapor de agua -Flujo rápido de agua -Exudación -Evaporación constante
		Mushroom	A5: 2120			
		Gours				

Los valores anuales de temperatura (Tem.), humedad relativa (Hum. Rel) y precipitaciones (Prec.) corresponden al periodo Abril-21/Abril-22. Los datos de tafoni fueron obtenidos por Soria et al.2022, los de la fractura y de las precipitaciones fueron proporcionados por la Bolsa de Cereales de Bahía Blanca (*). También se mencionan los tipos de espeleotemas presentes en cada sitio y las concentraciones polínicas absolutas.

El ópalo de los espeleotemas aquí estudiados provendría de la disolución directa del cuarzo (presente en los clastos, matrix y cemento) de la BCC, la cual a su vez se vincula con los cordones serranos adyacentes, conformados mayoritariamente por cuarcitas. Mientras que las arcillas (caolinita, illita, hematita) serían el producto de la meteorización (edafización según Venega et al. 2022b) de los silicatos; la muscovita, clorita y las plagioclasas son minerales comunes en rocas metamórficas que también conforman los cordones serranos contiguos.

En otros espeleotemas generados en tafoni de la BCC y en fracturas de cuarcitas del sector norte de las Sierras Australes (Grill et al. 2021; Grill et al. 2022a) también fue registrado el ópalo-A como variedad amorfa de la sílice; lo mismo ocurre en los espeleotemas silíceos desarrollados en tafoni del Batolito de Achala (Sierras Pampeanas, Cioccale 2009, Villar de Seoane et al. 2009).

Micropaleontología

Una propiedad a destacar del ópalo es su microporosidad, la cual permite la circulación del agua y el desarrollo y la preservación de organismos, evidenciado por la presencia de restos autóctonos (diatomeas, hongos y algas) y alóctonos (esporomorfos y fitolitos). Dentro de los restos autóctonos se destacan las diatomeas, organismos complejos que utilizan la sílice amorfa del espeleotema para la formación de sus propias estructuras orgánicas (Lewin 1965, Vidal Romaní 2010b, López Galindo y Vidal Romaní 2013). A su vez, al fosilizar entregan sílice al espeleotema.

Las especies más abundantes registradas en los espeleotemas de la BCC, *Hantzschia amphioxys* (Ehr.) Grunow y *Pinnularia borealis* Ehrenberg, son taxa aerofíticos que requieren de una fuente de agua como la humedad del aire, la condensación y filtraciones (Falasco et al. 2014) y mayormente oligotróficos, es decir, necesitan una baja disponibilidad de nutrientes (Nitrógeno, Fosforo, Potasio, entre otros) (Johanson 2010). Si bien estas condiciones priman en el ecosistema de los espeleotemas donde se han generado no en todas las muestras se hallaron diatomeas (muestras A7 y A5). Esta ausencia podría estar siendo provocada por algún cambio en el pH del medio. Los frústulos de las diatomeas no se disuelven fácilmente en pH de aguas naturales (pH 7) pero sí a partir de pH 8 (Lewin 1957). En el caso de *Hantzschia amphioxys*, reconocida en todos los espeleotemas, ocurre en aguas alcalinas y *Pinnularia borealis* puede crecer asociada a líquenes (Germain 1981, Van Dam et al. 1994). Mientras que los frústulos de *Nitzschia* sp. comienzan a disolverse a pH 8 (Jorgensen 1955). Este género fue identificado en las muestras A3, A8 y B1.

En cuanto a las esporas de hongos, estas tienen una capacidad relativamente baja de dispersión (Grill y Lamberto 2006), por ende, se asume que parte de ellos se habrían generado *in situ* y otras en las inmediaciones del espeleotema. Puntualmente, la mayor proporción de esporas de hongos respecto de las algas (muestra A5), considerando que las primeras son esporas de resistencia, permite interpretar que la humedad de la fractura vertical (de la ladera noroeste del cerro A) habría sido episódica.

Al igual que los hongos, parte de las esporas de algas se habrían generado *in situ* y otras habrían ingresado a los espeleotemas a través del agua fisural. En el caso de *Zygnema* sp., *Spirogyra* sp. y otras esporas de afinidad algal (*Mougeotia* sp., tipo 128, 137, 304 y 369, Van Geel et al. 1983) son representativas de aguas estancadas (o con leve movilidad), someras asociadas a una alta tolerancia salina bajo condiciones eu a mesotróficas. Es posible que estas condiciones se hallan desarrollado entorno a los espeleotemas durante periodos húmedos.

A este conjunto autóctono podría incorporarse la macrobiota asociada a los líquenes, holobiontes conformados por un hongo y un alga que han sido registrados en la superficie de la BCC (en el interior y exterior de los tafoni). Estos organismos reconocidos en diferentes tipos de ecosistemas y bioindicadores de la calidad atmosférica (pureza del aire) son capaces de disolver el cuarzo (Hallbauer y Jans 1977).

En relación a los microorganismos considerados alóctonos: esporomorfos (polen y esporas de bryophytas y pteridophytas) y fitolitos, ingresan al espeleotema a través del viento y del agua que escurre a lo largo de las fracturas, quedando entrampados en la microporosidad del ópalo al evaporarse y concentrarse el hidrogel de silicio (Vidal Romaní et al. 2003, 2010, López Galindo 2013).

Respecto de los granos de polen, se sabe que las asociaciones polínicas representan la vegetación "local ó extralocal" de un área (Grill y Lamberto 2006, entre otros). El análisis palinológico permitió inferir las comunidades vegetales dominadas por pastizales (poaceae y asteraceae) asociados con diferentes géneros de Pteridophytas (helechos). Dichas comunidades son análogas a aquellas que actualmente colonizan tres de los seis roquedales de las Sierras Australes determinadas por Frangi y Bottino (1995). En estas inferencias se consideran además la altura de los cerros, orientación de las laderas y los géneros florísticos inferidos microscópicamente. En los espeleotemas del tafone de la ladera suroeste del cerro A (muestras A1, A2, A3, A4) (445 msnm), los géneros de helechos (*Polystichum* sp., *Blechnum* sp., *Poa* sp.) y de polen (*Mimosa rocae*) permiten inferir una vegetación casmofítica con *Poa Iridifolia* – *Polystichum elegans* y otra con *Mimosa*

rocae (roquedales de altitudes inferiores a los 700 msnm) (Frangi y Bottino 1995). Mientras que en los espeleotemas de los tafoni y la fractura situados en las laderas noroeste de los cerros A (A5, A6, A7, A8) (450 msnm) y B (B1) (470 msnm), los géneros de los helechos (*Adiantum* sp., *Anemia* sp, *Polipodium* sp., *Blechnum* sp., *Cheilanthes* sp.) y de polen (*Poa* sp., *Stipa* sp y *Festuca* sp.), se asocian a una vegetación casmofítica con *Notholaena buchtienii* var *ventanensis* – *Wedelia buphtalmiflora* (roquedales de altitudes inferiores a 600 msnm) (Frangi y Bottino 1995).

La presencia de poliadas de poáceas y asteráceas, y las importantes proporciones de estas familias vegetales en los espectros polínicos, son indicativos de la proximidad de la fuente emisora de polen (faldeos de los afloramientos). El resto de los taxa polínicos (presentes en menor proporción), en general reflejan comunidades desarrolladas a mayor distancia (estepa pampeana, patagónica, bosques subantárticos, entre otros); aunque otros factores tales como productividad polínica y/o modo de polinización también influyen en su representatividad. Estos factores podrían justificar en parte la alta proporción de quenopodiáceas registrada en la muestra A3 (Fig. 9), ubicada en el fondo del tafone. Este taxa es característico de ambientes salobres, en consecuencia, su concentración anormal respecto al resto de las muestras, podría indicar periodos de alta evaporación.

En cuanto a las esporas de bryophyatas reflejan humedad local, entre ellas, *Phaeoceros* sp., es un género común dentro de la provincia de Buenos Aires y ha sido asociado a distintas comunidades vegetales y ambientes incluyendo horizontes con desarrollo de suelos (Prieto y Quattrocchio 1993). Su dispersión anemófila es frecuente en esporas con tamaños ≤

25 µm, en los espeleotemas estudiados el tamaño registrado es ≤ 38 µm, esto permite vincularlas con ambientes húmedos desarrollados en las proximidades de los espeleotemas (Mogensen 1984).

Acerca de los fitolitos (acumulaciones silíceas de ciertas plantas superiores), también son transportados por el viento o el agua hacia los espeleotemas, su preservación diferencial en los sedimentos (por largos periodos de tiempo) en relación a otros componentes orgánicos, obedece precisamente a su composición inorgánica (Piperno 2006).

En el análisis palinológico efectuado se destacan la excelente preservación de los palinomorfos y la importante diversidad taxonómica (Fig.9). Las mismas pueden vincularse fundamentalmente con el medio de depositación. Según Volkheimer y Melendi (1976) las litologías de grano fino y pH ácido, preservadas en ambientes reductores, son ideales para la conservación del polen. En el caso de los espeleotemas silíceos, la litología fina se vincula al ópalo – A, el cual a su vez trae aparejadas condiciones ácidas. En relación al ambiente reductor y se asocia fundamentalmente al interior de los tafoni. En los espeleotemas desarrollados en el exterior de los mismos ó en fracturas, la humedad relativa y la temperatura (típicas de sistemas serranos de latitudes medias) y la actividad microbiológica, compensan parcialmente la condición microambiental. Las condiciones oxidantes que pudieran acontecer por cambios en el pH y Eh no favorecerían la preservación de los palinomorfos.

En relación al importante valor de concentración polínica absoluta de 363.818 granos de polen/gr de ópalo alcanzado en la muestra B1 (Fig.9), además de estar relacionada a una alta disponibilidad de ópalo y elevado aporte polínico debido

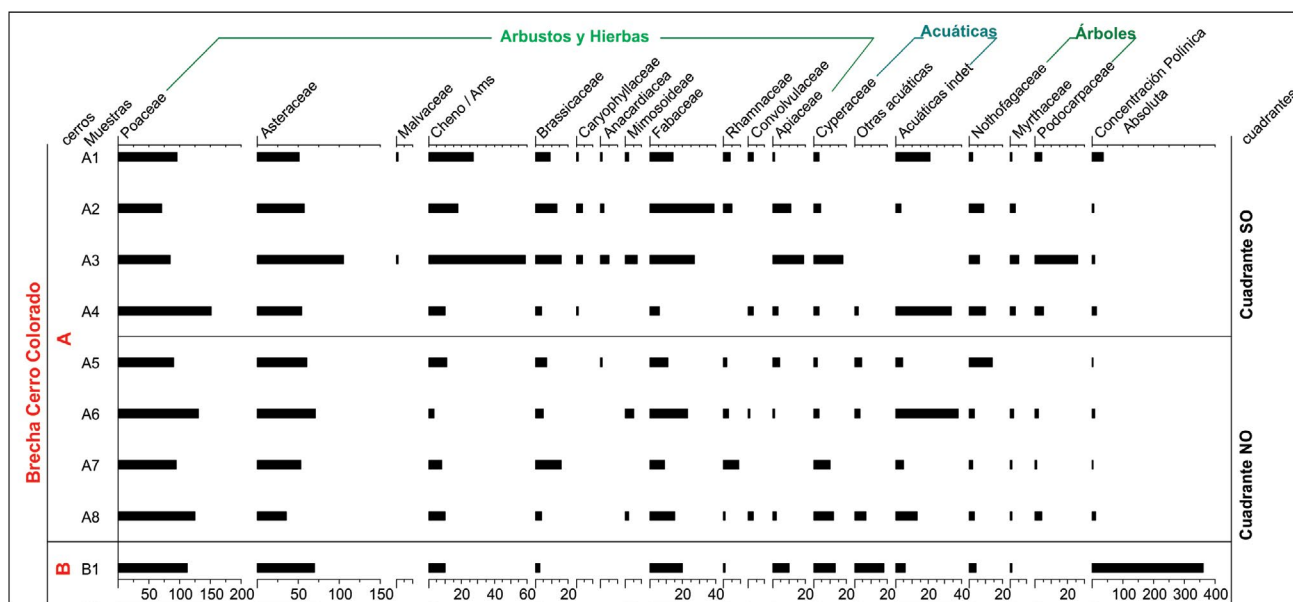


Figura 9. Diagrama Polínico (*) Concentración polínica absoluta (c.p.a).

a la orientación de los vientos y abertura del tafone (245°), podría estar representando una fluctuación climática regional. En cuanto a fluctuaciones climáticas vinculadas a episodios más húmedos (de orden local) se asociarían a valores relativamente importantes de polen de plantas acuáticas de algunos espeleotemas (muestras A1, A3, A4, A6, A8 y B1, Fig. 8). En este sentido se destaca la importancia de los estudios palinológicos de los espeleotemas silíceos como importantes “*proxy-data*” de las fluctuaciones climáticas (particularmente las precipitaciones) a nivel regional y local ocurridas en la región pampeana, la cual por su composición loésica, ofrece desde la palinología, escasa información.

En alusión a la edad de la asociación polínica, las mismas no permiten establecer una cronología precisa ya que las comunidades vegetales inferidas corresponden a las que actualmente colonizan algunos de los roquedales de las Sierras Australes. Sin embargo, se ha estimado que la acreción de un espeleotema de 1 cm de largo requiere de 100 años para formarse bajo un clima templado-húmedo (Sanjurjo et al. 2021, Sanjurjo y Vidal Romaní 2011). En consecuencia, se infiere que los espeleotemas serían relativamente recientes (Holoceno tardío) asociado a la presencia del ópalo-A (característico de los espeleotemas silíceos jóvenes; Vidal Romaní et al. 2010, entre otros), y sus escasas dimensiones (≤ 2 cm de espesor).

Para concluir, el crecimiento de un espeleotema ocurre solo cuando el agua circula lentamente por el interior de las cavidades ó fracturas. De allí la importancia de la “repetición y/o duración” de los períodos húmedos que contribuyen a la disolución de la sílice.

CONCLUSIONES

El análisis sistémico de espeleotemas silíceos realizado en la BCC permitió efectuar conclusiones en relación a los distintos “*proxy-data*” analizados.

En primera instancia se pudo concluir que las microformas planares, cilíndricas, concreciones y peloidales que caracterizan a los espeleotemas, estarían relacionadas con los mecanismos que controlan la circulación del agua. Dentro de ellos se destacan mecanismos generales (gravedad) y específicos (capilaridad, tensión superficial o adherencia). A ellos se suman las condiciones microambientales (humedad relativa (HR), condensación, temperatura del aire (Ta), evaporación, insolación) y la actividad biológica.

En cuanto a las microformas planares (*flowstones*, *gours*) y cilíndricas (estalactitas/ estalagmitas) (entre otros) con tamaños < 20 mm y texturas más compactas, predominantes

en el interior de los tafoni, se asociaron con HR elevada constante ($> 60\%$), condensación de vapor de agua y circulación lenta de agua. En estos microambientes significativamente más húmedos los palinomorfos y diatomeas fueron más abundantes.

Mientras que en las fracturas y en el exterior de los tafoni, las microformas planares (*gours*, tabicadas) y peloidales, más porosos y con dimensiones < 5 mm se vincularon con ambientes significativamente menos húmedos ($\leq 60\%$). En estas microformas el contenido microbiológico (diatomeas y polen) fue escaso o estuvo ausente.

En relación a la variedad de sílice amorfa presente en los espeleotemas asumimos que es el ópalo A, considerando que este mineraloide es la variedad de sílice opalina más frecuente en los espeleotemas silíceos y el primero en formarse sobre la superficie terrestre (Moore 1997). A su vez, lo vinculamos con la disolución directa del cuarzo, presente en los clastos, matrix y cemento de la BCC. No obstante, se asume también que parte de la sílice disuelta puede originarse a través de la actividad de líquenes, hongos, cianobacterias y bacterias sobre el cuarzo y los silicatos. En consecuencia, una génesis de origen químico y microbiológico, se contempla en el desarrollo de los espeleotemas estudiados.

Por otra parte, el análisis polínico efectuado permitió inferir el desarrollo de pastizales de poáceas y asteráceas, asociado con diferentes géneros de Pteridophytas (helechos). Los mismos reflejan tres (de los seis) complejos de vegetación casmofítica de los roquedales definidas por Frangi y Bottino (1995).

En alusión al contenido diatomológico, la presencia de diatomeas en los espeleotemas no estaría sólo sujeta a la disponibilidad de agua, sílice y nutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio) sino también a cambios de pH del medio.

Acerca de la edad de los espeleotemas estudiados, se infiere que la misma es relativamente reciente (Holoceno tardío?), dada la presencia del ópalo-A (característico de los espeleotemas silíceos jóvenes; Vidal Romaní et al. 2010, entre otros), sus escasas dimensiones (≤ 2 cm de espesor) y la comunidad vegetal inferida que no es más antigua que el Último Máximo Glacial (U.M.G.).

Los resultados obtenidos en el presente trabajo ratifican y amplían aquellos logrados en el trabajo de similar índole efectuado en la BCC por Grill et al. (2021).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Geología (U.N.S.) y al Instituto Geológico del Sur, donde se llevaron a

cabo las tareas de gabinete y laboratorio de este trabajo. El financiamiento se realizó a través del PGI 24/H141, subsidiado por S.E.C.Y.T. (U.N.S.), dirigido por la Dra. Silvia C. Grill. Se agradece también al Sr. Frasinet por permitirnos realizar las tareas de campo en su estancia y a la Bolsa de Cereales de Bahía Blanca por el otorgamiento de los datos meteorológicos.

REFERENCIAS

- Andreis, R., Spalletti, L. y Mazzoni, M. 1971. Sedimentología de la Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. En: Reunión sobre Geología Sierras Australes Bonaerenses, Prov. de Buenos Aires. CIC (La Plata): 65-96.
- Antonoli J.A. 1970. Fanglomerado Cerro Colorado, Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires. Comisión de investigaciones científicas. Notas, Vol. 6, N°4.
- Aubrecht, R., Brewer-Carías, C., Kováčik, L., Smída, B., Vlček, L., Lánczos, T. 2008. Microbial origin of opal speleothems in Venezuelan quartzite caves (Roraima group, Guyana highlands).
- Barreda, V., Anzotegui, M., Prieto, A., Acenolaza, P., Bianchi, M., Borromei, A.M., Brea, M., Caccavari, M., Garralla, S., Grill, S., Guersstein, G.R., Lutz, A., Mancini, M., Mautino, L., Ottone, G., Quattrocchio, M., Romero, E., Zamaló, M.C., Zucol, A. 2007. Diversificación y cambios de las angiospermas durante el Neogeno en Argentina. En: S. Archangelsky, T. Sanchez y, E.P., Tonni (eds.). Asociación Paleontológica Argentina, Publicación Especial 11, Ameghiniana 50° aniversario, pp. 173–191.
- Battarbee, R. W. 1986. *Diatom analysis* In: Berglund B.E (ed) Handbook of Holocene Paleoecology and Paleohydrology (London: Willey& Sons) p 527-570.
- Bish, D.L. and Post, J.E. 1988. Modern Powder Diffraction. Reviews in mineralogy.
- Burgos, J. J. y Vidal, A.L. 1951. Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. Meteoros I (1). Buenos Aires.
- Burgos, J.J. 1968. El clima de la Provincia de Buenos Aires. En A.L. Cabrera. (Ed.) Flora de la Provincia de Buenos Aires. Colección científica del INTA, Buenos Aires. Pp. 33 – 101.
- Cabrera, A.L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agronomía y Jardinería 2 (1). ACME, Buenos Aires. pp. 1 – 85.
- Caldcleugh, A. (1826) On the geology of Rio de Janeiro. Transactions of the Geological Society of London, 2-2, 69-72.
- Cioccale, M.A., Pasquini, A.I., Depetris, P.J. 2008. Hallazgo de espeleotemas silíceos en rocas graníticas del batolito de achala, Sierras Pampeanas de Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 63(3): 417 – 420.
- Cioccale, M., Pasquini, A., Grill, S. y De Petris, P. 2009. Un aporte al conocimiento de la génesis de espeleotemas silíceos a través de su contenido palinológico. Sierras Grandes de Córdoba-Argentina. I Reunión Argentina de Geoquímica de la superficie, Córdoba. Resúmenes: 89.
- Ehrlich, A. 1973. Quaternary diatoms of The Hula Basin (Northern Israel). Bulletin Geological Survey Israel, 58:1 – 39.
- Falasco, E., Hector, I., Isaia, M., Wetzel, C. E., Hoffmann, I. y Bona, F. 2014. Diatom flora in subterranean ecosystems: a review. International journal of speleology, 43 (3), 231-251. Tampa, FL (USA) ISSN 0392-6672
- Folk, R.L., Andrews, P.B. y Lewis, D.W. 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zeland, New Zeland Journal of Geology and Geophysics 13:937-968.
- Frangi, J.L. y Bottino, O.J. 1995. Comunidades vegetales de la Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata. Tomo 71(1), 93 – 133.
- Germain, H. 1981. Flore des Diatomees. Diatomophycees eaux douces et saumâtres du Massif Armoricaïn et des contrees voisins d'Europe Occidentale. Societe Nouvelle des Editions Boubee, Paris, p. 444.
- Grill, S., Lamberto, S. 2006. Análisis palinofacial de sedimentos actuales en la cuenca inferior del Rio Quequen Salado, provincia de Buenos Aires, Argentina: primeros resultados. Revista Española de Micropaleontología, 38(1), 77–92 (2006). ISSN 0556-655X.
- Grill, S., Lebinson, F., Gutiérrez Téllez, B. 2021. Siliceous speleothems in sedimentary breccia, Sierras Australes, Argentina. Springer Nature Switzerland AG 2021 P. Bouza et al. (Eds.): Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina, SPRINGEREARTH, pp. 437– 455. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8_18.
- Grill, S., Soria, F., Gutiérrez Téllez, B., Lebinson, F. 2022. Nuevas evidencias de espeleotemas silíceos en la Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Actas del VIII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas S9: 137-138. San Juan.
- Hallbauer, D. K.J. y Jahns, N.M. 1977. Attack of lichens on quartzite rock surfaces. Lichenologist, 9, 119 – 122.
- 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.
- Heusser, C. 1971. Pollen and Spores of Chile, p. 67. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Heusser, L., Stock, C. 1984. Preparation techniques for concentrating pollen from marine sediments and other sediments with low pollen density. Palynology 8(1), 225–227.
- Hill, C.A., Forti, P. 1995. The classification of cave minerals and speleothems. International Journal of speleology. 24(Phys.), 1-4: 77-82.
- Hill, CA., Forti, P. 1997. Cave Minerals of the world. National Speleological Society, Huntsville.
- Johansen, J., 2010. Diatoms of aerial habitats. In: The diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences. Edited by John P.

- Smol and Eugene F. Stoermer. Cambridge University Press, 2010. UK.
- Jorgensen EG. 1955. Solubility of silica in diatoms. *Physiol Plant* 8:864–851.
- 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 Dir. Geol. Min.* IX, 3.
- Konhauser, K. 2016. Geomicrobial Interactions with Silicon (Chapter eleven). Ehrlich's geomicrobiology, Six Edition (2016).
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. 1986. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bacillariophyceae 1. Teil, Band 2/1, 978 pp., Stuttgart.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H., 1988. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bacillariophyceae 2. Teil, Band 2/2, 589 pp., Stuttgart.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H., 1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bacillariophyceae 3. Teil, Band 2/3, 576 pp., Stuttgart.
- Kulkarni, H.V., Ford, J., Blank, J.G., Park, M., Datta, S. 2022. Geochemical interactions among water, minerals, microbes, and organic matter in formation of speleothems in volcanic (lava tube) caves.
- Kuznetsov SI. 1975. The role of microorganisms in the formation of lake bottom deposits and their diagenesis. *Soil Sci* 119:81–88.
- Lewin JC. 1957. Silicon metabolism in diatoms. IV. Growth and frustule formation in *Navicula pelliculosa*. *J Gen Physiol* 39:1–10.
- López Galindo, M.J. 2013. Biometeorización de rocas ígneas (Espeleotemas Silíceos desde una Perspectiva Geobiológica). Unpublished doctoral thesis, Universidad de Coruña, 342 p.
- Mogensen, G.S. 1984. The spore. En: R.M. Schuster (ed.), *New Manual of Bryology*. 1, 325 – 342.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C. 1997. X-Ray Diffraction and the identification and analysis of clay minerals.
- Noetinger, S., Pujana, R., Burrieza, A., Burrieza, H. (2017). Use of UV-curable acrylates gels as mounting media for palynological samples. *Revista Museo Argentino de Ciencias Naturales*, n.s., 19 (1), 19 – 23.
- Piperno, D. 2006. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. Altamira Press, Oxford.
- Prieto, A., Quattrocchio, M. 1993. Bryophytes y pteridophytes en sedimentos del Holoceno de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Anales de la Asociación de Palinólogos de Lengua Española* 6, 17 – 37 (1993).
- Rabassa, J., Zárate, M., Camilión, C. Partridge, T., Maud, R. 1995. Relieves relictuales de Tandilia y Ventania. IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses (Junín 1995). *Actas* 1, 256 – 259.
- Reille, M. 1992. *Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du nord*, p. 520. Laboratoire de botanique historique et palynologie URA CNRS, Marseille, France.
- Saavedra J., Sánchez, M. (1981). Origen de niveles continentales silicificados con alunita en el Pre-Luteciense de Salamanca, España. *Clay Min.*, 16.
- Sanjurjo, J., Vidal Romani, J.R., Pallí, L.I., Roqué, C. 2007. Espeleotemas de ópalo y pseudocarst granítico. *Cuaternario y Geomorfología*, 21(1-2), 123 – 134.
- Sanjurjo, J., Vidal Romani, J.R. 2011. Luminiscence Dating of Pseudocarst Speleothems: a First Approach. *Spectroscopy Letters*, 44: 543-548. DOI: 10.1080/00387010.2011.610422.
- Sanjurjo, J., Chamorro, C.A., Vidal Romani, J.R., Vaquero – Rodríguez, M., Barrientos, V., Kaal, J. 2021. On the genesis of aluminum – rich speleothems in a granite cave of NW Spain.
- Sauro, F., Lundberg, J., De Waele, J., Tisato, N., Galli, E., 2013b. Speleogenesis and speleothems of the Guacamaya Cave, Auyan Tepui, Venezuela. In: *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, Brno, pp. 298 – 304.
- Sellés Martínez J. (2001). Geología de la Ventania (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Journal of Iberian Geology*, 27, 43-70
- Siever, R., 1962. Silica solubility, 0–200 °C and the diagenesis of siliceous sediments. *J. Geol.* 70, 127–150.
- Silverman, M.P., Munoz, E.F., 1970. Fungal attack on rock: solubilization and altered infrared spectra. *Science* 169 (3949), 985–987.
- Soria M.F., Grill, S., Gill, V., Berón de la Puente, F., Lebinson, F. 2022. Caracterización microclimática de tafoni en la Brecha Cerro Colorado, Valle de las Grutas, Sierras Australes, Argentina. *Actas del VIII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*, Actas S1: 21-21. San Juan.
- Twidale, C.R., Vidal Romani, J.R. 2005. Landforms and Geology of Granite Terrains. *Balkema*, Leiden.
- Twiss, P.C., Suess, E. y Smith, R. M. 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Science of America, Proceedings* 33:109-115.
- Umbanhowar Jr., C.E., McGrath, M.J.: Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves and grasses. *Holocene* 8(3), 341–346 (1998).
- Vandevivere P, Welch SA, Ullman WJ, Kirchman DL. 1994. Enhanced dissolution of silicate minerals by bacteria at near-neutral pH. *Microb Ecol* 27:241–251.
- Van Dam, H.; Mertens, A. y Sinkeldam, J. 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 28: 117-133.
- Van Geel, B., Hallewas, D.P., Pals, J.P. 1983. A late Holocene deposit under the Westfriese Zeedijk near Enkhuizen (prov. of Noord-Holland, the Netherlands): palaeoecological and archaeological aspects. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 38 (1982/1983), 269–335.
- Venega, E., Grill, S. y Lebinson, F. 2022a. Sedimentología de la Brecha Cerro Colorado en el sector norte de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Actas XXI CGA (Sección Técnica VII, Sedimentología y Petrografía de Rocas Sedimentarias): 368-369*, Puerto Madryn (Chubut) 14-18.
- Venega, E., Grill, S., Morrás, H. y Lebinson, F. 2022b. Evidencias de edafización en la Brecha Cerro Colorado, Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Actas XXI CGA (Simposio V, Geomorfología, Geología del Cuaternario y Cambio Climático): 1075-1076*, Puerto Madryn (Chubut) 14-18.
- Vidal Romani, J.R., Vilaplana, J.M. 1983. Datos preliminares para el es-

- tudio de espeleotemas en cavidades graníticas. *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 7, 305–324.
- Vidal Romani, J.R., Twidale, C.R. 1998. *Formas y Paisajes Graníticos*. Series Monografías, 55, p. 411. Universidade da Coruna. Servicio de Publicacions.
- Vidal Romani, J.R., Twidale, C.R., Bourne, J., Campbell, E.M. 1998. Espeleotemas y formas constructivas en granitoides. Investigaciones recientes de la Geomorfología española. *Actas V Reunión Nacional de Geomorfología*, 772–782.
- Vidal Romani, J.R., Bourne, J.A., Twidale, C.R., Campbell, E.M. 2003. Siliceous cylindrical speleothems in granitoids in warm semiarid and humid climates. *Zeitschrift für Geomorphologie* 47(4), 417–437.
- Vidal Romani, J.R., Sanjurjo Sanchez, J., Vaqueiro Rodriguez, M., Fernandez Mosquera, D. 2010. Speleothems of granite caves. *Comunicaciones Geológicas*, t. 97, 71–80
- Vidal Romani, J.R., Sanjurjo Sanchez, J., Vaqueiro Rodriguez, M., Fernandez Mosquera, D. 2010b. Speleothem development and biological activity in granite cavities. *Geomorphologie. Relief, processus, environment*. November. 4, 337–346.
- Vidal Romani, J.R. González Lopez, L., Vaqueiro, M., Sanjurjo Sánchez, J., 2015. Bioweathering related to groundwater circulation in cavities of magmatic rock massifs.
- Vidal Romani, J.R. González Lopez, L., Vaqueiro, M., Sanjurjo Sánchez, J., 2015. Bioweathering related to groundwater circulation in cavities of magmatic rock massifs.
- Villar de Seoane, L., Vidal Romaní, J.R., Sanjurjo Sánchez, J. y Cárdenas, O. 2009. Estudios palinológicos de espeleotemas silíceos actuales de la provincia de Córdoba. XIV Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología. *Ameghiniana* 46 (4) suplemento, 2009-resúmenes: 146
- Volkheimer, W., Melendi, L. 1976. Palinomorfos como fósiles guía (tercera parte) Técnicas de laboratorio palinológico 1976. *Ameghiniana*, 19–37.
- Whitney, D.L. and Evans B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals.
- Wray, R.A.L. 1999. Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sydney region, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Science* 46 (4), 623-632.
- Wray R.A.L., Sauro, F. 2017. An updated global review of solutional weathering processes.