

Lám. 157. Localización del valle del río Piedra en la Cordillera Ibérica. Se señala también la situación del parque del Monasterio de Piedra. Modificada de Arenas et al. (2004).

ENTORNO GEOLÓGICO Y FORMACIÓN DE TOBAS EN EL PARQUE DEL MONASTERIO DE PIEDRA (ZARAGOZA): UN LABORATORIO NATURAL

DR.^a CONCEPCIÓN ARENAS ABAD
DR.^a MARÍA CINTA OSÁCAR SORIANO
DR. LUIS AUQUÉ SANZ
DR. CARLOS SANCHO MARCÉN

Universidad de Zaragoza

carenas@unizar.es

cinta@unizar.es

lauque@unizar.es

Resumen: Este trabajo resume los resultados de una investigación realizada en el río Piedra para conocer las características de la sedimentación y los factores relacionados con la formación de tobas en dicho ambiente. Los datos obtenidos entre 1999 y 2012, y los parámetros climáticos, hidrológicos, geológicos y biológicos disponibles, indican que la formación de tobas se intensifica notablemente en el entorno del Parque del Monasterio de Piedra, coincidiendo con el aumento de la pendiente del río. La formación de toba se produce en diversas situaciones, favorecida por la turbulencia del agua y, por ejemplo, en cascadas con tapices microbianos, puede alcanzar 15,5 mm/año, mientras que es menor en zonas de flujo lento, con sedimento suelto. En primavera y verano la formación de tobas es mayor debido al efecto de la temperatura en la solubilidad de la calcita y del CO₂ del agua y al desarrollo de la biota.

Palabras clave: Río Piedra, tobas, sedimentación actual, hidroquímica, clima, hidrología.

THE GEOLOGICAL CONTEXT AND THE TUSA FORMATION PROCESS IN THE MONASTERIO DE PIEDRA PARK (ZARAGOZA): A NATURAL LABORATORY

Abstract: *This paper summarizes the results of the research carried out in the Piedra River that aimed to understand the characteristics of the tufa sedimentation and the factors linked to the tufa formation in that context. The data obtained from periodic monitoring from 1999 to 2012, along with the available parameters of climatic, hydrological, geological and biological character, suggest that the tufa formation increases significantly in the surroundings of the Monasterio de Piedra*

Park, coinciding with an increase of the river slope. Tufa forms in diverse settings, favoured by the river water turbulence, e.g., in waterfalls with microbial mats, tufa growth raises up to 15.5 mm/year, while it is lower in slow flow areas, with loose sediment. In spring and summer tufa formation is higher due to the temperature influence on the calcite and CO₂ solubility in water, and to the biota development.

Keywords: *Piedra River, tufas, modern sedimentation, hydrochemistry, climate, hydrology.*

INTRODUCCIÓN

El Parque del Monasterio de Piedra constituye un enclave singular en el que el conjunto arquitectónico se enmarca en un paisaje sorprendente.¹ El visitante que entra en el recinto del Parque, máxime si llega desde los páramos circundantes, se admira de la abundante vegetación y la profusión de cursos y saltos de agua del río Piedra. Justamente estas son algunas de las características que propician la formación de tobas, junto con la composición química del agua del río. La formación de tobas en el río Piedra no se limita al área del Parque, sino que se extiende por el cañón del río, aguas arriba del Parque, sobre todo en la zona conocida como Lugar Nuevo. Además, desde este lugar y hasta Nuévalos, se observan numerosas tobas fósiles formadas durante períodos anteriores

¹ Concepción Arenas Abad^{1,2}, M.^a Cinta Osácar Soriano^{1,2}, Luis Auqué Sanz¹ y Carlos Sancho Marcén¹, firman el presente trabajo como miembros del: 1) Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. Calle Pedro Cerbuna, 12. 50009 Zaragoza; y 2: Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA) y Grupo Geotransfer, Universidad de Zaragoza.

Agradecimientos: este trabajo es una contribución de los proyectos UNIZAR-1999, UNIZAR-2001, REN2002-03575, CGL2006-05063, CGL2009-09216/CLI, CGL2009-09216/BTE y CGL2013-42867-P del Ministerio de Economía y Competitividad (y denominaciones anteriores) y de los grupos de investigación Análisis de Cuencas Sedimentarias Continentales, Geotransfer, Paleoambientes del Cuaternario, y Modelización Geoquímica del Gobierno de Aragón-Universidad de Zaragoza, y del Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA). Agradecemos la colaboración de la Dirección y personal del Parque del Monasterio de Piedra en el trabajo de campo.

Este trabajo es homenaje a nuestro compañero y amigo Carlos Sancho Marcén, que falleció en febrero de 2019. Su dedicación y entusiasmo por la Geología nos guiaron en el estudio de las tobas en la Cordillera Ibérica, tanto los depósitos cuaternarios como la sedimentación actual.

del Cuaternario. Esta combinación de tobas actuales y fósiles es uno de los rasgos que hacen especial este lugar.

Las tobas fósiles, por sus características de formación, son importantes archivos del clima del pasado. Su abundancia, espesor y propiedades texturales y geoquímicas permiten deducir algunos rasgos paleoclimáticos y ambientales, como la temperatura, la humedad y la vegetación.² Por ello, su estudio se ha desarrollado ampliamente en los últimos años.³ La investigación de las tobas fluviales funcionales ayuda a interpretar el significado paleoclimático de las tobas fósiles. El entorno de Monasterio de Piedra constituye un área sobresaliente en la que desarrollar un estudio combinado de tobas actuales y fósiles.

La Cordillera Ibérica es una zona de especial abundancia de tobas. Son numerosos los estudios sobre tobas fósiles de esa región,⁴ pero existen pocos sobre la sedimentación actual. Desde hace unos años un equipo pluridisciplinar, centrado en la Universidad de Zaragoza, ha acometido el estudio de la formación actual de tobas en diversos cursos fluviales. Se trata de un trabajo a largo plazo (comenzó en 1999 y se prolongó hasta 2012) que partió del Parque del Monasterio de Piedra como un enclave privilegiado para la investigación de estos procesos geológicos.⁵

En este artículo se resumen los resultados obtenidos en el entorno del Monasterio de Piedra que ponen de manifiesto la relevancia del Parque como laboratorio natural, a escala internacional.

QUÉ SON Y CÓMO SE FORMAN LAS TOBAS

La palabra toba deriva del latín *tofus* y, de forma general, designa *una piedra caliza muy porosa y ligera formada por la cal que llevan en disolución las aguas de ciertos manantiales y que van depositándola en el suelo o sobre las plantas u otras*

² ANDREWS, Julian, 2006, pp. 85-104.

³ CAPEZZUOLI, Enrico, GANDIN, Anna y PEDLEY, Martyn, 2014, pp. 1-21.

⁴ Ej.: GONZÁLEZ MARTÍN, Juan Antonio y GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, M.^a José, 2014.

⁵ VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, ARENAS, Concha, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta, AUQUÉ, Luis y PARDO, Gonzalo, 2010, pp. 1027-1049; ARENAS, Concha, VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, AUQUÉ, Luis, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta y PARDO, Gonzalo, 2014, pp. 90-132.

*cosas que se hallan a su paso.*⁶ Este material se conoce popularmente como *piedra tosca*, utilizada frecuentemente en construcción.

Desde un punto de vista geológico, las tobas son depósitos de carbonato cálcico formados a temperatura ambiente en entornos de agua dulce (ríos y lagos), en relación con plantas y microorganismos. La reacción química básica que gobierna la formación de las tobas es:



Cuando este equilibrio químico se desplaza hacia la derecha, el bicarbonato (HCO_3^-) y el calcio (Ca^{2+}) disueltos en el agua se combinan para que el carbonato cálcico (CaCO_3) precipite, con desprendimiento de anhídrido carbónico (CO_2). El carbonato cálcico, generalmente calcita, se deposita con frecuencia sobre los elementos vegetales adyacentes, formando costras que reproducen su forma (Lám. 158). Es decir, para la formación de tobas es preciso: a) que el agua contenga suficiente bicarbonato y calcio para alcanzar la saturación en calcita; y b) que haya flora y fauna acuática (macro y microscópica). Hay que destacar que, en las tobas, los componentes del agua en la que se forman tienen un origen esencialmente meteórico, con una temperatura inferior a 30°C. El término travertino, que a veces se asocia o se confunde con el de toba, se refiere a depósitos calcáreos similares, pero formados a partir de aguas termales ($T > 40^\circ\text{C}$), por lo que suelen contener menos restos vegetales.

FACTORES QUE CONTROLAN LA FORMACIÓN DE TOBAS

La formación de tobas requiere unos condicionantes que atañen a varios aspectos, que en orden de mayor a menor escala, son: 1) el entorno morfológico, geológico y climático, 2) el cuerpo de agua a partir del cual se forman, y 3) a las circunstancias que determinan la saturación en calcita de ese agua.

1) Respecto al entorno, los principales rasgos que influyen en el desarrollo tobáceo son: a) la existencia de sistemas kársticos desarrollados en rocas carbonatadas, cuya dinámica sedimentaria externa produce las tobas;⁷ b) el clima

⁶ *Diccionario de la Lengua de la Real Academia*, 1970.

⁷ ARENAS, Concha, AUQUÉ, Luis, ELÍAS, M.^a Jesús, LONGARES, Luis Alberto, OSÁCAR, M.^a Cinta, PARDO, Gonzalo, PEÑA, José Luis, SANCHO, Carlos y VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, 2004, pp. 11-32.



Lám. 158. Imagen de campo de un depósito de toba. Nótese los moldes vegetales sobre los que se formó la cubierta de calcita. Se señalan una hoja y el hueco de un tallo.

cálido y la suficiente disponibilidad de agua, y c) la presencia de gradientes topográficos en el curso fluvial generador de las tobas.

2) En cuanto a las características del agua: a) agua rica en calcio y bicarbonato, que son los componentes químicos de la toba; b) existencia de un sustrato biológico, microbiano y/o macroscópico, que promueve la precipitación y fijación de la calcita,⁸ y c) algunos rasgos hidrodinámicos como la velocidad, la profundidad y la turbulencia del agua y la ausencia de turbidez, que contribuyen manifiestamente al crecimiento tobáceo.

⁸ PENTECOST, Allan 2005; ARENAS, Concha, VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, AUQUÉ, Luis, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta y PARDO, Gonzalo, 2014, pp. 90-132; CAPEZZUOLI, Enrico, GANDIN, Anna y PEDLEY, Martyn, 2014, pp. 1-21.

3) Finalmente, para que, con las condiciones anteriores, precipite la calcita, es preciso que se produzca un descenso del contenido del CO_2 del agua, que desplace hacia la derecha la reacción química antes descrita.

Algunos de los factores que favorecen la pérdida de CO_2 del agua son: a) la temperatura, ya que cuando aumenta disminuye la solubilidad del CO_2 en el agua, b) la agitación mecánica, c) la evaporación, d) el aumento del pH. También puede estar biológicamente mediada, por ejemplo por fotosíntesis.

Además, los organismos vivos presentes en el agua (microorganismos: cianobacterias y algas en general, y macroorganismos: briofitas, juncos, etc.) pueden atrapar las partículas de calcita dispersas en el agua y/o servir de sustratos para la nucleación y precipitación de calcita. Los biofilms, formados por sustancias poliméricas extracelulares (EPS), contribuyen de forma especialmente relevante a la fijación de las partículas de calcita.

Todos estos rasgos y condiciones aparecen claramente representados en el sistema tobáceo del río Piedra.

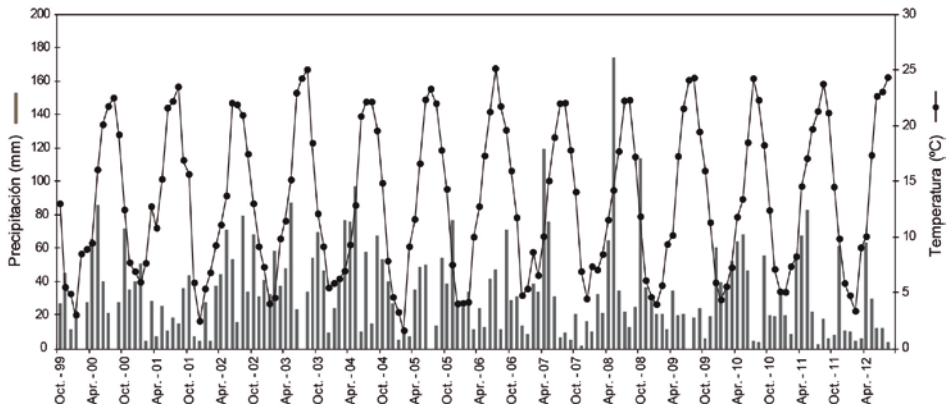
EL ENTORNO Y LA GEOLOGÍA DEL MONASTERIO DE PIEDRA

El clima de toda esta zona es de tipo continental mediterráneo, con fuertes contrastes térmicos estacionales y precipitaciones concentradas en primavera y otoño. La altitud del Monasterio de Piedra es de 786 m. La temperatura media es de unos 13°C , con medias de 5°C en invierno y 23°C en verano, y la precipitación media anual es de unos 400 mm (medidas en las estaciones meteorológicas de Milmarcos y Nuévalos).⁹ En la Lámina 159 aparece la variación temporal de temperatura y precipitación.

El Parque del Monasterio de Piedra está situado en la Cordillera Ibérica (Lám. 157). En esta región, sobre los materiales Paleozoicos y Triásicos, se encuentran calizas y dolomías del Jurásico, arenas del Cretácico inferior y calizas y dolomías del Cretácico superior. Los conglomerados, areniscas y arcillas cenozoicos se superponen a estas unidades. Durante el Cuaternario la red fluvial se encajó sobre ese sustrato y configuró la red fluvial actual, incluyendo la del río Piedra. A lo largo del valle del río Piedra pueden verse las tobas y otros depósitos formados durante el Cuaternario.¹⁰

⁹ ARENAS, Concha, VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, AUQUÉ, Luis, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta y PARDO, Gonzalo, 2014, pp. 90-132.

¹⁰ SANCHO, Carlos, ARENAS, Concha, VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, PARDO, Gonzalo, LOZANO, M.^a Victoria, PEÑA, José Luis, HELLSTROM, John, ORTIZ, José Euge-



Lám. 159. Variación temporal de la temperatura y la precipitación (datos de las estaciones meteorológicas de Milmarcos y Nuévalos) y caudal (medido en la estación de aforo de Nuévalos). Adaptada de Arenas et al. (2014).

Las rocas carbonatadas cretácicas constituyen el acuífero del que se abastece el río Piedra y la causa del marcado carácter bicarbonatado cálcico de sus aguas. Las fuentes principales del río se encuentran en Cimballa, unos 10 km aguas arriba del Monasterio, con un caudal regular del orden de 1m³/s, que es el principal aporte de agua: el caudal promedio del río es de 1,06 m³/s. El agua contiene de 76 a 106 mg/L de Ca²⁺ y una alcalinidad (HCO₃⁻) entre 256 y 310 mg/L; su pH oscila entre 8 y 8,5.¹¹ La presencia de flora y microorganismos a lo largo del curso es constante.

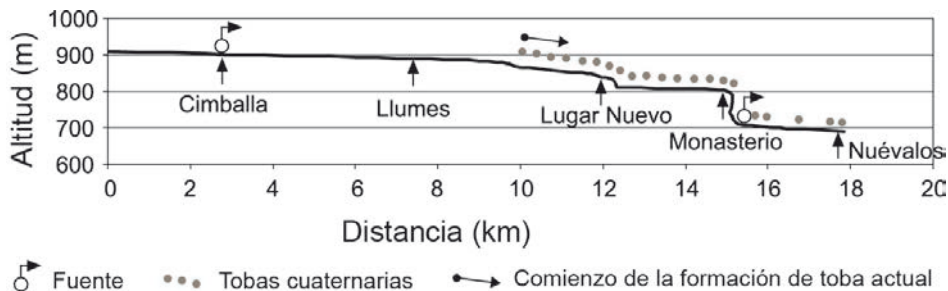
Una característica importante del entorno del Monasterio de Piedra es la existencia en el río de saltos topográficos importantes que constituyen cascadas: la Caprichosa y la Cola de Caballo dentro del Parque, y la Requijada (Lugar Nuevo) 2 km. aguas arriba (Lám. 157). En la Lámina 160 se representa el perfil topográfico del río Piedra.

Otras zonas de la Cordillera Ibérica comparten muchas de estas características: acuíferos en rocas carbonatadas mesozoicas, ríos con aguas bicarbonatadas-cálcicas y abundante flora, por lo que las tobas fósiles (cuaternarias) y actuales abundan en toda la Cordillera Ibérica.¹²

nio, OSÁCAR, M.^a Cinta, AUQUÉ, Luis y TORRES, Trinidad, 2015, pp. 398-414.

¹¹ VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, ARENAS, Concha, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta, AUQUÉ, Luis y PARDO, Gonzalo, 2010, pp. 1027-1049.

¹² PEÑA, José Luis, SANCHO, Carlos, ARENAS, Concha, AUQUÉ, Luis, LONGARES, Luis Alberto, LOZANO, M.^a Victoria, MELÉNDEZ, Alfonso, OSÁCAR, M.^a Cinta,



Lám. 160. Perfil topográfico del río Piedra, desde Cimballa hasta su entrada en el embalse de La Tranquera. Adaptada de Arenas et al. (2014).

LOS SISTEMAS DE SEDIMENTACIÓN ACTUALES COMO CLAVES PARA ENTENDER EL PASADO

El estudio del proceso de formación de tobas bajo condiciones ambientales controladas permite conocer los factores que lo gobiernan y su reflejo en las propiedades de las tobas. El sistema natural se convierte en un verdadero laboratorio en el que los parámetros físicos y químicos del agua y del sedimento se controlan mediante la instalación de dispositivos de medida y de muestreos periódicos.

El estudio implica la obtención de diversos tipos de datos:

a) Parámetros físicos, como temperatura, velocidad y profundidad del agua, así como el espesor del depósito y sus características. Además, es preciso disponer de información sobre la precipitación, temperatura del aire y descarga del río.

b) Sobre el sustrato biológico: macro y microorganismos y su actividad e interacción con la formación de las tobas.

c) Parámetros químicos: concentración de iones mayores y menores en el agua, contenido en isótopos estables y en elementos traza.

Todos estos factores se reflejarán en mayor o menor medida en las propiedades de la toba: espesor del depósito, textura, estructura, y características geoquímicas (isótopos estables y elementos traza).

Procedimiento de control

En primer lugar se diferenciaron los distintos tipos de ambientes presentes y las correspondientes facies sedimentarias sobre el terreno. Los ambientes diferenciados fueron (Lám. 161):

Áreas de flujo rápido, sin macrofitas (A, B),

Áreas de flujo lento, con plantas sumergidas (C, D),

Cascadas escalonadas, con musgos, algas macroscópicas, gramíneas y bacterias (E, F, G).

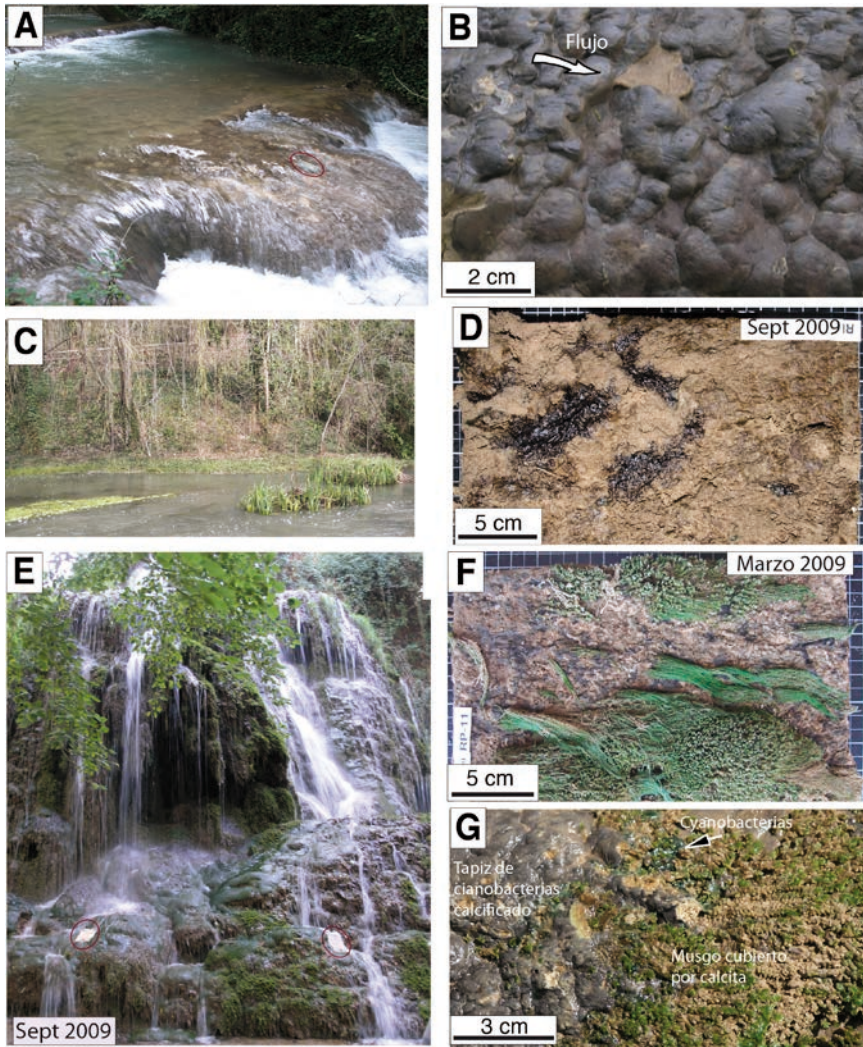
Zonas de aerosol y salpicadura, cerca de cascadas (E),

Cascadas de salto vertical, con musgos y plantas colgantes,

Cuevas detrás de las cascadas (no estrictamente fluviales).

Seguidamente se instalaron unas losetas de caliza, de 25x15x2 cm, sujetas al lecho del río, para recoger sobre ellas el sedimento formado (Lám. 162). Se colocaron losetas en un total de 20 posiciones que representaban los diferentes subambientes. Semestralmente se retiraban temporalmente para medir el espesor acumulado con un calibre; las medidas se realizaban en marzo y en septiembre, al acabar las estaciones frescas (otoño+invierno) y las cálidas (primavera+verano). Además, en diciembre y junio se muestreaban el agua y el sedimento de más reciente precipitación. Durante los muestreos, se midieron también la velocidad del agua en cada posición, el pH y la temperatura. Además, desde junio 2007 a diciembre 2012 se dispuso de medidas de temperatura horarias por medio de sensores instalados dentro del río. Finalmente, una vez retiradas definitivamente, las losetas se cortaron perpendicularmente a la dirección del flujo y se reconocieron los depósitos correspondientes a los semestres (proyectando las medidas semestrales de espesor) y se muestreó el sedimento para su análisis.

Sobre las muestras tomadas se realizaron diversos análisis: análisis químico del agua (cationes, aniones, cálculo de la presión de CO₂ y de la saturación en calcita), análisis de isótopos estables y de elementos traza de agua y sedimento, estudio por microscopía óptica y electrónica del sedimento (muestreado en el campo y en las losetas). En total, la monitorización abarcó desde noviembre 1999 a septiembre 2012, es decir 13 años.



Lám. 161. Ambientes de formación de tobas en el Parque Natural del Monasterio de Piedra. A) Áreas de flujo rápido, sin macrofitas. Nótese la loseta dispuesta sobre el lecho, que sirve de sustrato para controlar la acumulación de toba. B) Tapiz cianobacteriano formado con flujo rápido de agua. C) Área de flujo lento, con plantas sumergidas. D) Depósito formado en áreas de flujo lento: limo de composición calcítica y tapiz cianobacteriano (color oscuro). E) Cascada Trinidad: cascada escalonada, con musgos, algas macroscópicas, gramíneas y bacterias. Destacan en blanco dos losetas. Nótese que al lado de las zonas con corriente fuerte, existen zonas que reciben aerosol y salpicadura, y el desarrollo de una pequeña cueva. F) Depósito sobre una loseta en zona de cascada con corriente continua: musgos, algas filamentosas y tapices bacterianos, con cubierta de calcita. G) Detalle del depósito en una zona de fuerte corriente en una cascada, con tapiz de cianobacterias calcificado al lado de musgos con cubierta de calcita.



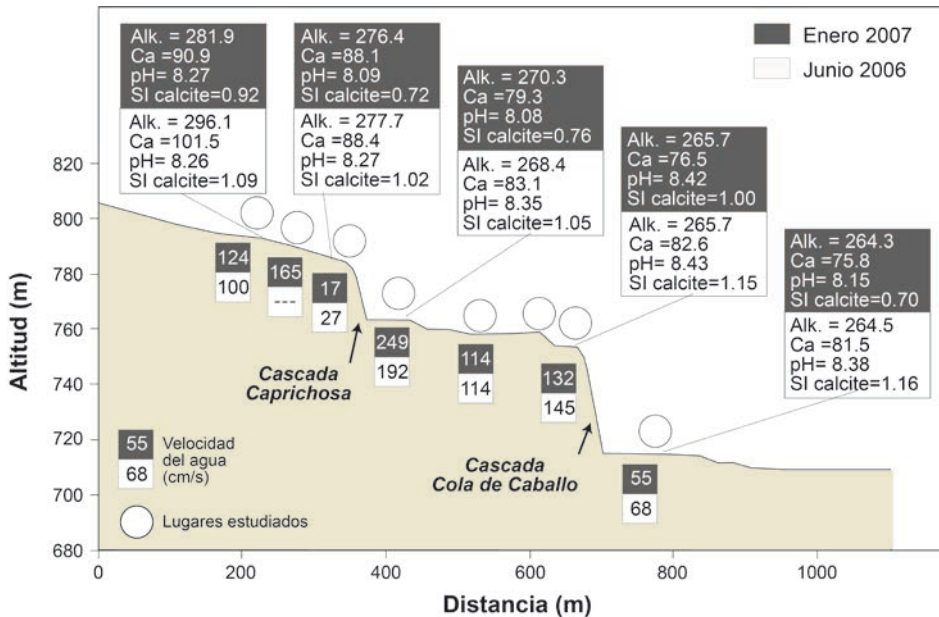
Lám. 162. Sustrato de caliza (loseta) utilizado para recoger el depósito de toba, con el dispositivo para la medida del espesor acumulado. Véase en la lámina 161 A y E losetas instaladas en el río.

RESULTADOS

Hidroquímica

El agua del río Piedra a su paso por el Monasterio de Piedra es de tipo bicarbonatado-cálcico, con pH básico (entre 7,0 y 8,7), conductividad entre 554 y 707 $\mu\text{S}/\text{cm}$, alcalinidad (HCO_3^-) entre 239 y 310 mg/L y calcio disuelto entre 75-105 mg/L. Los valores calculados de CID (carbono inorgánico disuelto) varían entre 47 y 81 mg/L y el agua se encuentra siempre sobresaturada con respecto a la calcita, con valores de índice de saturación ($\log \text{PAI}/\text{K}(\text{T})$) positivos (+0,7 y +1,2).¹³ Desde la entrada a la salida del parque se produce una

¹³ VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, ARENAS, Concha, SANCHO, Carlos, AUQUÉ, Luis, OSÁCAR, M.^a Cinta, PARDO, Gonzalo, 2011, pp. 241-274. ARENAS, Concha, VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, AUQUÉ, Luis, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta y PARDO, Gonzalo, 2014, pp. 90-132.

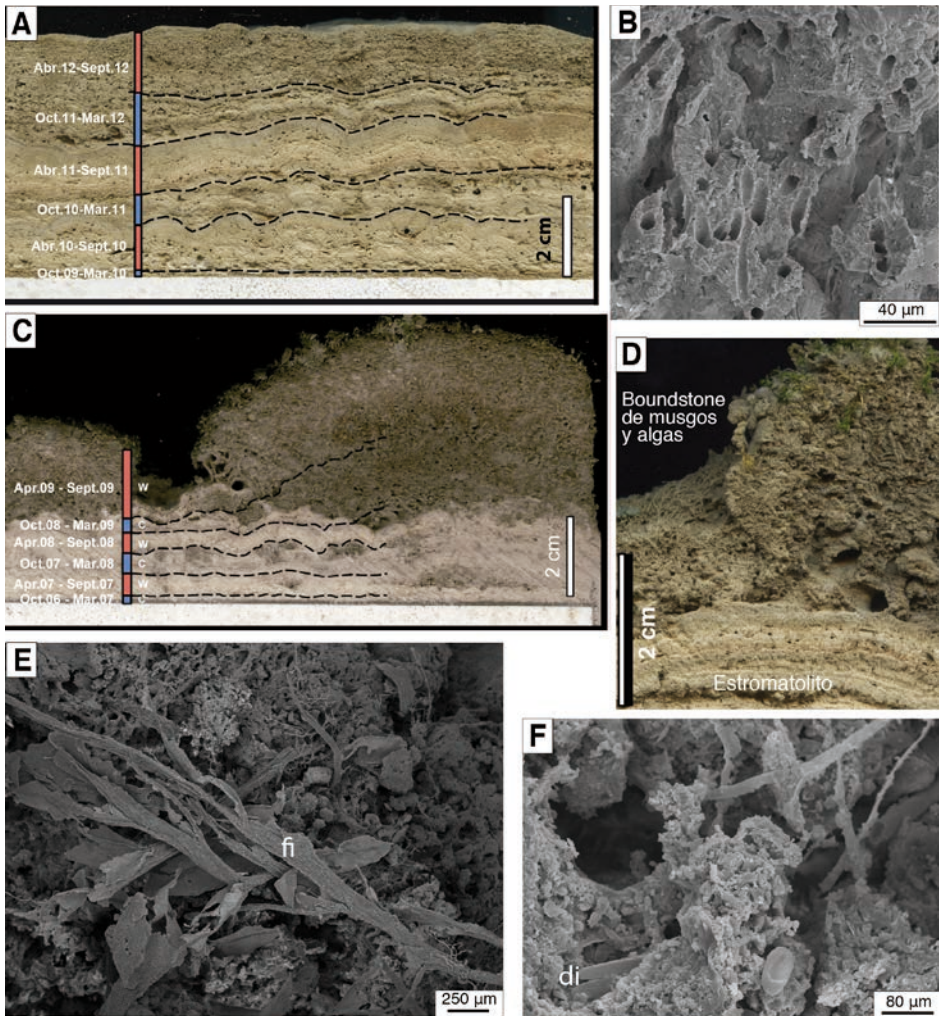


Lám. 163. Variación espacial y temporal de los parámetros hidroquímicos medidos en el parque del Monasterio de Piedra. Se ponen valores de dos momentos del estudio.

disminución del contenido en calcio, alcalinidad y CO_2 , que se corresponde con la precipitación de calcita en ese recorrido (Lám. 163). Esa disminución es mayor en junio que en enero, por lo que la calcita precipita a lo largo de la mayor parte del año, pero mucho más en el período cálido.

Características de los depósitos y ambientes de sedimentación

Los depósitos sobre las losetas tienen distintas características según el ambiente en el que se han formado (Lám. 164). En las áreas de flujo rápido, sin macrofitas, los depósitos muestran laminación (A). Las láminas están formadas por empalizadas de tubos a partir de la precipitación de calcita alrededor de cianobacterias (B). Constituyen extensos depósitos estromatolíticos. En las áreas de flujo lento se acumulan sedimentos de grano fino (fragmentos de tobas) y limo carbonatado, mayormente sin consolidar y sin laminación (D). Los depósitos en las cascadas escalonadas consisten en musgos, algas macroscópicas, gramíneas y bacterias; todos estos componentes están cubiertos de calcita y producen masas esponjosas y costras laminadas (estromatolitos) (C, D, E). En



Lám. 164. Características de los depósitos formados sobre las losetas. A) Loseta cortada mostrando el depósito laminado formado en un área de flujo rápido. B) Imagen de microscopio electrónico de barrido de A. El depósito consiste en empalizadas de tubos formados por precipitación de calcita alrededor de cianobacterias (las cavidades corresponden a los moldes). C) Loseta cortada mostrando el depósito formado en una cascada escalonada. D) Detalle del depósito de C. E) y F) Imágenes de microscopio electrónico de barrido del depósito formado en cascadas. Algas filamentosas (fi) y diatomeas (di), junto con musgo cubierto por calcita. Nótese el aspecto grumoso de la calcita.

las losetas en zonas que reciben aerosol y salpicadura, cerca de cascadas, los depósitos son similares a los de las cascadas escalonadas (F), pero presentan mucho menos desarrollo. En las cascadas de salto vertical, si bien no se instalaron losetas, los depósitos están formados por musgos y plantas colgantes cubiertas por calcita, produciendo cortinas. En las cuevas que se originan detrás de las cascadas, los depósitos sobre las losetas son en su mayoría costras laminadas microbianas. Además, en las cuevas existen estalactitas que han crecido por el recubrimiento de los tallos de plantas colgantes de las cascadas.

Tasas de depósito

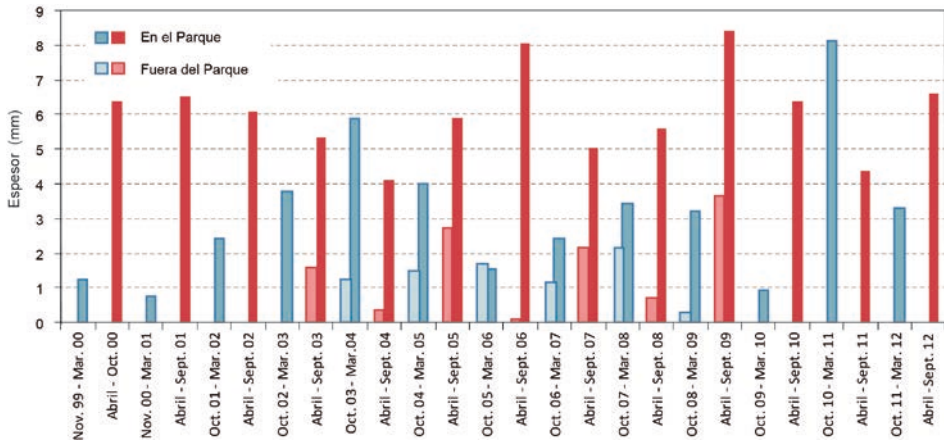
Las tasas de depósito varían según los ambientes de sedimentación (Lám. 165). Los resultados obtenidos proceden del registro en 20 posiciones a lo largo de 13 años (1999 a 2012), por lo que son representativos. Las mayores tasas (13,75 mm/año) se encuentran en las zonas de flujo rápido, con estromatolitos, mientras que en las zonas de flujo lento se deposita menos sedimento (3,57 mm/año). Las áreas de cascadas tienen tasas altas, pero muy variables en función de los procesos de erosión. La menor acumulación se da en zonas de salpicadura y en las cuevas, por el menor aporte de agua y la escasa luminosidad, respectivamente. Estos resultados señalan que la pérdida de CO₂ por procesos mecánicos (esto es, velocidad y turbulencia del agua) determina la cantidad de calcita que se forma.

Por otro lado, en todos los ambientes (excepto en los de tasa de depósito muy baja), el depósito es mayor en el período cálido que en el fresco (Lám. 166). Se deduce, por tanto, que la temperatura es un factor fundamental: las variaciones estacionales de temperatura influyen en la cantidad de CO₂ disuelto en el agua y en el desarrollo de la biota y, de modo significativo, determinan la intensidad de actividad fotosintética.¹⁴

¹⁴ VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, ARENAS, Concha, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta, AUQUÉ, Luis y PARDO, Gonzalo, 2010, pp. 1027-1049. ARENAS, Concha, VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, AUQUÉ, Luis, SANCHO, Carlos, OSÁCAR, M.^a Cinta y PARDO, Gonzalo, 2014, pp. 90-132.

Características ambiente de depósito	Facies sedimentarias	Espesor períodos cálidos (mm)	Espesor períodos frescos (mm)	Espesor medio anual (mm)
Áreas de flujo rápido	Estromatolitos	9.34	4.41	13.75
Áreas de flujo lento y remansos	Sedimento carbonatado suelto (limo, fitoclastos)	2.38	1.19	3.57
Cascadas escalonadas, flujo continuo	Boundstones de musgos y algas filamentosas. Estromatolitos	5.57	2.68	8.25
Áreas de aerosol y salpicadura, en cascadas	Estromatolitos finos y parches de musgos y algas (<i>boundstone</i>)	1.00	0.38	1.38

Lám. 165. Tasas de depósito obtenidas a partir de medidas semestrales del espesor sobre losetas en los distintos ambientes fluviales. Son promedios del conjunto de las losetas instaladas en el río Piedra desde 1999 a 2012 (detalles en Arenas et al., 2014).



Lám. 166. Tasas de depósito semestrales a lo largo del tiempo. Son promedios del conjunto de las losetas instaladas en el río Piedra desde 1999 a 2012. Adaptada de Arenas et al. (2014).

Geoquímica: isótopos estables

Los isótopos estables de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) pueden aportar información sobre las características ambientales y, muy especialmente, sobre las condiciones climáticas en que se formaron los depósitos. Para este tipo de análisis se tomaron muestras de los depósitos de las losetas con un registro más continuo: los estromatolitos. Así, los depósitos formados en las estaciones frescas tienen valores de $\delta^{18}\text{O}$ más altos que los formados en las cálidas; de este modo, la evolución a lo largo del tiempo es cíclica. En el caso de los valores de $\delta^{13}\text{C}$, su evolución no tiene un patrón claro y es difícil de interpretar debido a que sobre él intervienen numerosos parámetros. Además del patrón cíclico, se aprecia que el $\delta^{18}\text{O}$ presenta una evolución hacia valores más bajos, que representan un aumento de la temperatura de unos 2°C a lo largo de los 13 años de estudio (1999-2012).¹⁵ Por lo tanto, las tobas laminadas de tipo estromatolítico son buenos registros de las condiciones climáticas de una región, por lo que este tipo de análisis en el registro rocoso puede ser útil para descifrar el clima del pasado.

LAS TOBAS CUATERNARIAS DEL RÍO PIEDRA

En el valle del río Piedra y en particular en su tramo inferior, cerca del Parque y hasta la desembocadura en el embalse de la Tranquera, existen imponentes depósitos de toba que se formaron durante el Cuaternario. Su espesor es máximo en la zona de Lugar Nuevo y la Ermita de Nuestra Señora la Blanca, donde está en torno a 90 m. Las edades obtenidas mediante diversos métodos de datación absoluta indican que estos depósitos se formaron en diferentes momentos del Pleistoceno Medio y Superior (350 ka, 255-230 ka, 195-145 ka y 80 ka) y el Holoceno (2,7-0,8 ka).¹⁶

¹⁵ OSÁCAR, M.^a Cinta, ARENAS, Concha, AUQUÉ, Luis, SANCHO, Carlos, PARDO, Gonzalo y VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, 2016, pp. 126-144.

¹⁶ PEÑA, José Luis, SANCHO, Carlos, ARENAS, Concha, AUQUÉ, Luis, LONGARES, Luis Alberto, LOZANO, M.^a Victoria, MELÉNDEZ, Alfonso, OSÁCAR, M.^a Cinta, PARDO, Gonzalo y VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, 2014, pp. 159-172. SANCHO, Carlos, ARENAS, Concha, VÁZQUEZ-ÚRBEZ, Marta, PARDO, Gonzalo, LOZANO, M.^a Victoria, Peña, José Luis, HELLSTROM, John, ORTIZ, José Eugenio, OSÁCAR, M.^a Cinta, AUQUÉ, Luis y TORRES, Trinidad, 2015, pp. 398-414.

El estudio estratigráfico y sedimentológico permite interpretar que estos depósitos se formaron en ambientes de cascada-barrera y represamiento, con desarrollo de depósitos de musgos y estromatolitos en los primeros, y de arenas y limos de carbonato en los represamientos. Son representativos los afloramientos que se encuentran en Lugar Nuevo y en las cercanías del parque. Además, en el barranco de los Arcos existen unos depósitos de tobas que se formaron a partir de la difluencia del río Piedra por barrancos laterales hacia el Oeste, como consecuencia del cierre que produjeron las cascadas-barreras de musgos en el cauce del Piedra.

La similitud entre estas tobas fósiles y los depósitos obtenidos durante la monitorización avala la extrapolación de los conocimientos obtenidos de este estudio al análisis paleoambiental de las tobas cuaternarias.

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que el sistema tobáceo del Monasterio de Piedra es el resultado de una compleja interacción de procesos físicos, químicos y biológicos y que los resultados obtenidos proporcionan excelente información sobre el clima, hidrología y algunas características geológicas de la región. Estos conocimientos pueden extrapolarse al pasado y probablemente también al futuro. En definitiva, el Monasterio de Piedra, es un extraordinario laboratorio natural para el estudio de la formación de tobas. Por ello, además del patrimonio artístico e histórico incluye un patrimonio natural y científico de gran relevancia.