



SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES QUE PERMITAN DIAGNOSTICAR EL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA 'ESTRUCTURA Y FUNCIÓN' DE LOS DIFERENTES TIPOS DE FORMACIONES TOBÁCEAS

Juana Vegas
Luis Carcavilla
Ana María Cabrera





SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES QUE
PERMITAN DIAGNOSTICAR EL ESTADO DE
CONSERVACIÓN DE LA 'ESTRUCTURA Y FUNCIÓN'
DE LOS DIFERENTES TIPOS DE FORMACIONES
TOBÁCEAS





Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización.

El presente documento fue realizado en el marco del proyecto *Establecimiento de un sistema estatal de seguimiento del Estado de Conservación de los Tipos de Hábitat en España*, promovido y financiado por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, desarrollado entre 2015 y 2017.

Dirección técnica del proyecto

Rafael Hidalgo Martín¹

Realización y producción

Tragsatec

Coordinación general

Elena Bermejo Bermejo² y Juan Carlos Simón Zarzoso²

Coordinación científica

Juana Vegas Salamanca³

Autores

Juana Vegas Salamanca³

Luis Carcavilla Urqu³

Ana María Cabrera Ferrero³

Coordinación y revisión editorial

Jara Andreu Ureta²

Íñigo Vázquez-Dodero Estevan²

¹ Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental. Ministerio para la Transición Ecológica

² Tragsatec. Grupo Tragsa

³ Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

A efectos bibliográficos la obra debe citarse como sigue:

Vegas J, Carcavilla L & Cabrera A M. 2019. Selección y descripción de variables que permitan diagnosticar el estado de conservación de la 'Estructura y función' de los diferentes tipos de formaciones tobáceas. Serie "Metodologías para el seguimiento del estado de conservación de los tipos de hábitat". Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid. 32 pp.

Las opiniones que se expresan en esta obra no representan necesariamente la posición del Ministerio para la Transición Ecológica. La información y documentación aportadas para la elaboración de esta monografía son responsabilidad exclusiva de los autores.



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica

Secretaría General Técnica

Centro de Publicaciones

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 638-19-088-X

ÍNDICE

1. ESTRUCTURA DE LOS TIPOS DE HÁBITAT TOBÁCEOS	7
1.1. Estructura vertical y horizontal.....	7
2. FUNCIONES DE LOS TIPOS DE HÁBITAT DE FORMACIONES TOBÁCEAS	9
3. EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO 'ESTRUCTURA Y FUNCIÓN'	15
3.1. A escala local	15
3.1.1. Factores extrínsecos	22
3.1.2. Factores intrínsecos.....	25
4. REFERENCIAS	27
Bibliografía adicional de interés.....	31



1. ESTRUCTURA DE LOS TIPOS DE HÁBITAT TOBÁCEOS

1.1. Estructura vertical y horizontal

En general, las formaciones tobáceas crecen en la vertical pero sobre todo 'progradan' y se expanden lateralmente, en la parte frontal. Otros procesos de índole geomorfológica como la karstificación y erosión participan también en la evolución natural de estas formaciones. Por ello, es frecuente hablar de edificios donde parte de los mismos pueden estar activos (precipitación actual o sub-actual de carbonato), mientras que otros sectores de los frentes, desprovistos de briofitos y sobre los que actúan con diferente intensidad los procesos erosivos (mecánicos y químicos), no registran ningún tipo de precipitación. En principio, es posible distinguir dos patrones de formación de tobas: los de crecimiento vertical (o subvertical e incluso en visera) asociados a incrustaciones provocadas por la vegetación localizada en cascadas, manantiales, etc.; y los de acreción horizontal, laminaciones subhorizontales asociadas a canales, represas, encharcamientos (zonas palustres) o lagunas. En ambos patrones son necesarios dos requisitos: aporte de agua que sea capaz de enriquecerse en el subsuelo de bicarbonatos a partir de un sustrato calizo y dolomítico, asegurando los caudales subterráneos y la eficacia de los procesos de disolución, que necesitan altas concentraciones de CO₂. Así, la estructura de las formaciones tobáceas y su tipo de crecimiento está íntimamente relacionada con la posición geomorfológica de las zonas de descarga de los acuíferos carbonatados. Por ello, en función de su localización, las formaciones tobáceas se suelen emplazar en dos tipos preferentes de posiciones geomorfológicas:

- 1) En fondos de valle vinculados a ambientes fluviales, fluvio-lacustres y palustres asociados a flujos enérgicos (micro-rupturas, barreras tobáceas, etc.), aguas lénticas o incluso estancadas.
- 2) En laderas y/o al pie de surgencias kársticas, donde a su vez pueden establecerse algunos subtipos condicionados por el desnivel de los saltos y por el volumen, así como por la regularidad de las descargas de agua desde los acuíferos kársticos.
 - 2.1) En vertientes dominadas por cantiles, muy escarpadas, se desarrollan delgados cuerpos tobáceos dominados por musgos parietales recubriendo saltos decamétricos de lento desarrollo lateral salvo en el pie de las cascadas. Su pequeña tasa de crecimiento se relaciona a un balance donde la precipitación de carbonatos es ligeramente superior a las pérdidas por erosión provocada por episodios de alta energía, vinculados a momentos de descarga caudalosa y violenta de los acuíferos colgados que alimentan este tipo de surgencias.
 - 2.2) En vertientes de pendiente con menor inclinación dominan dos tipos de construcciones condicionadas por la altura de las surgencias con respecto al fondo de valle:
 - 2.2.1) si el manantial kárstico se sitúa en el segmento superior o medio de las laderas, los procesos de precipitación de carbonatos en estos ámbitos fontaneros evolucionan progresivamente hacia un conjunto de replanos tobáceos escalonados y de perfil cuneiforme. Sus morfologías ofrecen techos muy planos (y por ello secularmente dedicados al uso agrícola) y taludes muy verticalizados donde se ubican los saltos de agua colonizados por importantes masas y penachos briofíticos. Su superficie funcional depende de la alimentación hídrica. Al desarrollarse como cuñas, sus frentes 'progradan' hacia el interior del valle y con el paso del tiempo aumentan el desnivel de sus saltos de agua. De igual modo, la naturaleza porosa y carbonatada de los edificios puede favorecer el desarrollo de conductos kársticos en el interior



del edificio tobáceo que, en ocasiones, provoca su desarticulación y la formación, a su pie, de otro conjunto adventicio. Con frecuencia, en el interior de los conductos se acumulan diversos tipos de espeleotemas (depósitos de precipitación química similares a los que precipitan en cuevas). En algunos lugares, se han establecido las tasas de sedimentación anual referidas a este subtipo: en Brihuega (Guadalajara) fueron obtenidas velocidades de crecimiento de unos 2-3 cm/año mientras que valores excepcionales, cercanos a los 10 cm/año, han sido registrados en otros conjuntos del sistema Ibérico.

- 2.2.2)** si el manantial se emplaza en el segmento inferior de las laderas, la formación tobácea adoptará un perfil tendido y cóncavo, quizás roto por pequeñas graderías y menos propicio para la instalación de briofitas. La escasa pendiente favorece la instalación de pequeños ambientes palustres colonizados, además por hepáticas, mientras que los briofitos suelen adaptarse a terracitas de salto centimétrico y mínima anchura, desarrolladas en sentido paralelo al flujo de agua ofreciendo estructuras de progradación hacia aguas abajo. En este dominio distal dominan las tobas detríticas masivas y estratificadas procedentes de la erosión de los carbonatos situados aguas arriba.

Las tobas calcáreas están asociadas a las surgencias y flujo de aguas carbonatadas. La precipitación del carbonato suele ocurrir de manera estacional en la cuenca mediterránea o continua según los casos. Ocupen la posición que sea, en los edificios de grandes dimensiones lo habitual es que solo un sector sea funcional. Sobre todo si se tiene en cuenta que la mayor parte de sus volúmenes se han desarrollado en momentos más húmedos que los actuales, especialmente en los estadios isotópicos 5 y 1 (Óptimo climático del Holoceno). Así las actuales acumulaciones son un relicto alimentado por las mismas surgencias de entonces, hoy con caudales mucho más disminuidos e incluso solo rezumantes en momentos puntuales. De aquí se deriva que en las áreas más secas muchos briofitos ofrezcan un recubrimiento discontinuo temporalmente lo que genera problemas a la hora de su representación cartográfica como depósitos hoy funcionales.

Generalmente, las tobas calcáreas son depósitos de pequeñas dimensiones, sin embargo, puede darse el caso de que constituyan complejos sistemas y/o grandes volúmenes (cientos de miles de metros cúbicos). En España hay ejemplos muy excepcionales como las lagunas de Ruidera (Ciudad Real) que conforman un entramado tobáceo activo de alto valor geomorfológico, petrológico, ecológico y paisajístico; al igual que el entorno del río Piedra (Zaragoza) con numerosos saltos y espectaculares cascadas. Por otro lado, hay núcleos de población se emplazan y se asientan sobre grandes depósitos tobáceos con el consiguiente riesgo geotécnico, como ocurre en Letur (Albacete), Brihuega (Guadalajara), etc.

Las tasas de crecimiento anual de ciertas estructuras carbonatadas integradas en conjuntos tobáceos del sistema Ibérico, han sido establecidas desde hace años. Así, a finales de la década de los 80, y en edificios situados en la rama castellana de la provincia de Guadalajara, se han estimado crecimientos elevados para tres especies diferentes de musgos. Dos de ellas coinciden con *Cratoneuron commutatum* y *Bryum pseudotriquetrum*, máximos responsables de la precipitación carbonatada. El otro musgo, *Catoscopium nigratum*, tiene una importancia menor y los tres parecen comportarse con unas tasas de precipitación de calcita que sigue un ritmo estacional: el crecimiento máximo se produce en primavera



y a partir de entonces decrece hasta el otoño haciéndose mínimo en los meses invernales con menor insolación y menor temperatura.

En conjunto, las tasas de crecimiento anual de estos tres musgos son (Weijemars *et al.* 1986):

- *Cratoneuron commutatum*: 3-11 cm/año
- *Bryum pseudotriquetrum*: 4-14 cm/año
- *Catocopium nigratum*: 1-3 cm/año

En la rama aragonesa, más recientemente, en el excepcional paraje del Monasterio de Piedra, se han obtenido valores de crecimiento inferiores. En este tipo de hábitat el crecimiento de los musgos se ha establecido mediante la instalación de agujas y tabletas, con valores de 33 mm/año, fluctuando los valores máximos y mínimos entre 41 y 22 mm anuales (Vázquez-Urbez *et al.* 2005, 2010). Sin embargo, estas medidas se pueden considerar puntuales y esporádicas, de manera que no se tiene una estimación del volumen de toba precipitado al año en los diferentes sistemas. Del mismo modo, la aplicación de prácticas de monitorización de los procesos de sedimentación, así como las propiedades físicas y químicas del agua en la que se forman este tipo de carbonatos continentales son escasas en la península ibérica comparadas con la extensa bibliografía internacional volcada en este tipo de cuestiones. Lejos de ser un dato simplemente estadístico, conocer esta información permitiría estimar de manera cuantitativa la evolución a lo largo del tiempo de los tipos de hábitat de formaciones tobáceas activas, para así poder detectar tendencias generales o impactos locales.

2. FUNCIONES DE LOS TIPOS DE HÁBITAT DE FORMACIONES TOBÁCEAS

Los tipos de hábitat de las formaciones tobáceas cumplen importantes funciones ambientales: son un importante reservorio de biodiversidad, participan en la regulación de diversos procesos ambientales tanto a escala global como a escala regional y local, suponen una fuente de materia prima y tienen, a su vez, un importante valor geológico, histórico y cultural.

- **Función de soporte de biodiversidad:** está relacionada con la capacidad de estos tipos de hábitat para albergar distintas formas de vida. Las comunidades vegetales ubicadas en las formaciones tobáceas se desarrollan en microambientes de alta humedad y sobre sustratos compuestos por materiales de dominancia calcítica, con pH básicos y donde la evolución edáfica es, casi siempre, muy escasa. En las tobas calcáreas ubicadas en cascadas, es habitual encontrar *Cratoneuron commutatum* asociado a las incrustaciones más importantes, aunque también suele estar presente *Eucladium verticillatum*. Como ejemplo de la variación de especies vegetales que participan en la formación de tobas, es frecuente (habitual) advertir en zonas permanentemente sumergidas el predominio de precipitados condicionados por la actividad de algas (cianofíceas y clorofíceas), en lugares afectados por la oscilación del nivel de agua predominan las hepáticas y diversos tipos de musgos, en los bordes de zonas lacustres y palustres también participan mirófitas y carófitas, entre otras. Aunque la diversidad de especies en las formaciones tobáceas puede considerarse relativamente baja en comparación con otros ecosistemas terrestres en la misma zona biogeográfica, tienen una alta proporción de especies características, lo que las convierte en importantes reservorios de biodiversidad. También juegan un papel fundamental durante las fases larvarias de algunas familias de quironómidos, en especial de los simúlidos

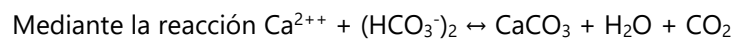


(*Simuliidae*). Así, las formaciones tobáceas son tipos de hábitat únicos y complejos con una gran importancia para la conservación de la biodiversidad tanto a nivel de ecosistema como a nivel de especie y a nivel genético. Las tobas juegan un papel relevante en la biodiversidad a nivel de tipo de hábitat debido a su habilidad para autoorganizarse y adaptarse a diferentes condiciones ambientales y a nivel genético, debido a su aislamiento y la heterogeneidad característica de este tipo de hábitat. Uno de los aspectos que está mereciendo mayor atención por parte de diversos grupos de investigación a nivel internacional se refiere a la naturaleza de los procesos bioinducidos para la precipitación de calcita. Los debates y esfuerzos por demostrar el peso de la actividad biológica en la mineralización de carbonato son ya clásicos (Barnes 1965; Dandurand *et al.* 1982; Golubic 1973; Merz-Preiß & Riding 1999). Los últimos trabajos demuestran la relevancia de los organismos en la mineralización activa mediante el metabolismo y pasiva mediante la nucleación de carbonato (Arp *et al.* 2001, 2010; Shiraishi, *et al.* 2010; Souza-Egipsy *et al.* 2005, 2006; Takashima & Kano 2008). Recientemente se ha empezado también a inventariarse mediante técnicas genéticas el cortejo de especies de bacterias que se desarrollan sobre la superficie y dentro de los milímetros más superficiales de toba y travertino. Por tanto, la localización de ríos calcificantes se muestra también relevante para la microbiología que estudia los taxones asociados a estos sistemas (Nga *et al.* 2006) y los procesos de biomineralización y su relación con el metabolismo bacteriano. Estas investigaciones están especialmente volcadas en la búsqueda de posibles análogos extremófilos y a la potencial vida extraplanetaria (Souza-Egipsy *et al.* 2011).

- **Funciones de regulación ambiental:** están relacionadas con la capacidad de las formaciones tobáceas para regular aspectos ambientales a escalas globales, regionales y/o locales.

– **Regulación del clima global**

Las tobas, debido a su capacidad para almacenar carbono durante el proceso de precipitación de carbonato, tienen el potencial de jugar un papel fundamental en la regulación del clima global, aunque hay muy pocos trabajos científicos que hayan realizado cálculos de la tasa de secuestro de carbono a nivel mundial para este tipo de hábitat. El C fijado o secuestrado en las formaciones tobáceas se realiza de forma inorgánica (carbonato de calcio), aunque en el proceso de precipitación se libera el CO₂ del agua que a su vez se recicla en el ciclo de la fotosíntesis de las plantas que coexisten en este tipo de hábitat.



Precipitación calcita Fotosíntesis

Así que las tobas y travertinos, en virtud de su composición química mayoritariamente carbonatada, constituyen sumideros locales de carbono (Prado-Pérez *et al.* 2010). El volumen total de dióxido de carbono atrapado en el planeta por unidad de tiempo en los carbonatos continentales terrestres no ha sido aún estimado con fiabilidad, pero no cabe duda de su importancia. El incremento del efecto invernadero atmosférico natural, ha forzado a la



comunidad internacional a evaluar con mayor precisión los ciclos geoquímicos y bioquímicos relacionados con los gases implicados en este cambio global (Basso 2012; Kennedy *et al.* 2010; Xinping & Wei-Jun 2011), para desarrollar, entre otras, estrategias de geoingeniería como el secuestro de CO₂ en acuíferos susceptibles para ello (Lilliestam *et al.* 2012). La evaluación volumétrica de los flujos de carbono disuelto de las rocas carbonatadas a lo largo del Cuaternario durante los diferentes periodos climáticos y la relevancia de la re-precipitación de carbono en tobas y travertinos en términos volumétricos no se ha abordado más que como experiencia piloto en algunos edificios travertínicos (Prado-Pérez *et al.* 2010) y tobáceos (Huerta *et al.* 2011).

– **Regulación del clima local**

Sin embargo, en España, dada la superficie limitada de este tipo de hábitat con respecto a otros, y su distribución mayoritaria pero muy dispersa en la cuenca mediterránea, tienen una capacidad de regulación a escala local. Las tobas, al estar ligadas a tipos de hábitat húmedos tienen influencia en las condiciones climáticas locales y, en menores ocasiones, regionales a través de la captura de CO₂ y su influencia en las condiciones de humedad de la zona.

– **Regulación hidrológica**

Las formaciones tobáceas tienen un rol fundamental en aspectos relacionados con el almacenamiento, retención y calidad del agua de las cuencas en las que se encuentran, sobre todo las relacionadas con cursos fluviales y manantiales. Dentro de este tipo, las barreras tobáceas hacen de sistema natural para la retención y almacenamiento de agua y pueden ayudar a mitigar tanto los efectos de las inundaciones como de la sequía.

– **Regulación química**

Las formaciones tobáceas ejercen una importante función de regulación química de las aguas. Sobre todo con referencia al carbono en el ion HCO₃⁻, puesto que la precipitación de calcita hace que las aguas estén menos cargadas en bicarbonato y en Ca²⁺ aguas abajo de los cursos de agua donde se sitúan las formaciones tobáceas.

- **Funciones productivas:** están relacionadas con la capacidad de proveer materias primas y aprovechar hidráulicamente los saltos de agua de las formaciones tobáceas por parte del ser humano.

– **Piedra natural**

Los carbonatos originados en los tipos de hábitat tobáceos han sido empleados tradicionalmente como piedra natural para la construcción y decoración, puesto que es un material fácil de obtener con frentes de explotación en superficie y muy accesibles desde las poblaciones del entorno. Por sus propiedades físicas y mecánicas son rocas de baja densidad y bajo peso, muy fáciles de tallar y con buen comportamiento como aislantes; que en regiones de clima árido y semi-árido de la región mediterránea son resistentes a los procesos erosivos (González-Martín & González-Amuchastegui 2014). Esta roca es muy apreciada comercialmente porque admite cualquier tipo de acabado superficial (pulido, abujardado,



estucado o resinado) y tiene una estética muy apreciada por su bandeado y coloración. Las principales canteras para su explotación comercial en España están en Alhama de Almería (Almería) y Godella (Valencia). Las tobas se comercializan bajo la denominación de 'travertinos' para revestir suelos, paredes y fachadas, así como para interiorismo. A nivel constructivo, la alta porosidad de las tobas ha provocado que sean ancestralmente utilizadas como material de construcción. Las tobas constituyen un material ligero, muy aislante y fácil de trabajar. Por ello estos materiales han sido labrados, canterados y empleados en la construcción de viviendas y edificios civiles y religiosos de gran importancia, quedando sillares de toba y travertino incorporados en el Patrimonio Histórico-Artístico de multitud de monumentos. Incluso la palabra 'travertino' viene de *lapis tibertinus*, es decir piedra del Tíber, explotada junto a ese río en Roma y se refiere a un tipo de roca ornamental muy utilizado (y cotizado) para revestimiento de edificios. Desde el Renacimiento y con un nuevo apogeo en los siglos XIX y XX los jardines pretendían recrear la naturaleza en ambientes urbanos fabricando 'cuevas' en muchos parques con fragmentos de travertinos, como los existentes en El Retiro (Madrid), alrededores de la Torre Eiffel (París) o los jardines del Palacio Pitti (Florencia). Diversos estudios profundizan en las propiedades de las tobas y travertinos como material de construcción (García-del-Cura *et al.* 2012). Esta explotación o utilización no se limita a canteras en sectores inactivos, sino que en algunos casos es posible ver ejemplos de tobas y travertinos activos en los que se han construido viviendas y diferentes tipos de construcciones monumentales, como en Cívica (Guadalajara), el acueducto romano de Liria en su tramo de Peña Cortada (Domeño, Valencia), la puerta gótica del Burgo de Osma, el muelle romano de Almuñécar, innumerables iglesias por todo el país, numerosos edificios protegidos de la ciudad de Granada o el ya citado Monasterio de Piedra (Zaragoza).

– **Piedra para fabricación de cal**

Los carbonatos tobáceos por su composición química y fácil extracción también han sido empleados para la fabricación de cal. Destaca este recurso en las islas Canarias, pues la mayoría de caleras en todas sus islas están directamente relacionadas con las formaciones tobáceas asociadas a surgencias y manantiales en ambiente volcánico.

– **Aprovechamiento hidráulico**

Los ecosistemas tobáceos situados en los saltos de las barreras fluviales ofrecen caudales regulares y elevados que se han aprovechado hidráulicamente para la instalación de molinos, batanes o ferrerías desde época histórica.

– **Aprovechamiento hidroeléctrico**

Desde inicios del siglo XX el establecimiento de centrales hidroeléctricas derivaron y modificaron el caudal de muchos ríos de la región mediterránea con un impacto directo en los tipos de hábitat tobáceos fluviales, puesto que en estas zonas se aseguraba la disponibilidad de caudal y desniveles con saltos de agua idóneos para esta actividad, incluso en épocas estivales. Un caso emblemático son las centrales hidroeléctricas del entorno de las lagunas de Ruidera, donde además se perforaron túneles, canales y aliviaderos para desviar el caudal afectando de manera sustancial a este tipo de hábitat (Marín-Magaz 2007). Sin embargo, a partir de la década de los 50 del siglo XX muchos de ellos fueron abandonados por el mejor



rendimiento de los grandes embalses, pero no se han restaurado para recuperar las condiciones originales de estos tipos de hábitat únicos en la Península.

– **Embalses naturales e infraestructuras para riego**

Los ecosistemas de tipo lacustre en barreras fluviales fueron considerados durante la Ilustración como embalses naturales para abastecer zonas de la meseta sur, como también fue el caso de las lagunas de Ruidera (Marín-Magaz 2007), los sistemas tobáceos de la sierra de Alcaraz o el Júcar en la región de la Manchuela (Castilla-La Mancha); con toda la red de canales y caces para riego derivados de estos ecosistemas.

- **Función de archivo ambiental y paleoclimático:** la precipitación de las tobas está directamente ligada a factores medioambientales que condicionan la físico-química de la precipitación del carbonato cálcico en ambientes continentales. Si a este hecho se unen datos paleobotánicos y paleofaunísticos de restos conservados y fosilizados en estas formaciones y que sobre las tobas y travertinos pueden aplicarse técnicas de datación numérica, se entiende su potencial para realizar reconstrucciones paleoambientales y paleoclimáticas. Por ello, las formaciones tobáceas son muy útiles para entender la evolución del clima en el medio continental de los últimos millones de años, proporcionando valiosa información sobre condiciones locales y regionales climáticas (Pentecost 2005). De hecho, su potencialidad como archivos paleoclimáticos, fundamentalmente del periodo Cuaternario, de gran resolución temporal, les ha proporcionado un creciente interés como complemento a los indicadores petrológicos y geoquímicos del registro endokárstico (espeleotemas) (Andrews 2006; Anzalone *et al.* 2007; Fairchild & Baker 2012). Sin embargo, los espeleotemas tienen ciertas limitaciones, debido a la dificultad de integrar la información puntual que representan cada uno de ellos y al difícil acceso a las cavidades donde se encuentran. Por eso, las tobas se utilizan como complemento a la información paleoambiental obtenida de los espeleotemas. En este sentido, se han realizado numerosas aproximaciones a las variables físico-químicas con implicación paleoambiental que pueden quedar registradas en tobas y travertinos laminados, dados mediante técnicas radiométricas (Bischoff *et al.* 1988; Eikenberg *et al.* 2001; Frank *et al.* 2000; Garnett *et al.* 2004; Mallick & Frank 2002; Ortiz *et al.* 2009). Además, desde una perspectiva más genérica, las tobas provenientes de aguas meteóricas suelen experimentar mayores tasas de sedimentación durante periodos cálidos y húmedos, quedando su propia existencia como registro sedimentario indicador de estadios climáticos interglaciares, que son favorables a su formación. No obstante, en ocasiones algunos condicionantes particulares pueden propiciar la formación de tobas y travertinos bajo climas teóricamente desfavorables, debido a factores locales como microclimas, posiciones latitudinales medias o bajas, origen derivado de aguas termales o incluso una actividad tectónica que implique variaciones en el nivel freático que incidan en los procesos kársticos, de manera que el control tectónico se superpone al climático (Díaz-Hernández *et al.* 2000; Horowitz 1989; Szabo 1990). En cualquier caso, cronológicamente la mayor parte de las tobas calcáreas del mundo han sido ubicadas en los periodos climáticos definidos por los Estadios Isotópicos Marinos (MIS del inglés *Marine Isotope Stages*) impares (Shackleton & Opdyke 1973), dominados por condiciones más húmedas y cálidas (Durán 1989; Hennig *et al.* 1983; Horvatinčić *et al.* 2000; Ortiz *et al.* 2009; Rihs *et al.* 2000; Vázquez-Urbez 2008; Wang *et al.* 2004). Dada la limitación cronológica de las series de uranio y a la poca capacidad de



preservación de los sedimentos tobáceos en el registro cuaternario, la mayor parte de las fases datadas se restringen al Holoceno y al último interglaciario. Por ello, también existen en el registro sedimentario ibérico fases de precipitación de carbonato coincidentes con estadios isotópicos pares, aunque son menos frecuentes (Arenas *et al.* 2010; Bischoff *et al.* 1988; Díaz-Hernández *et al.* 2000). A mayor resolución temporal, se está tratando de demostrar la capacidad antrópica durante el Holoceno para modificar el medio ambiente hasta el punto de modificar la sedimentación de este tipo de depósitos (Ordoñez *et al.* 2005). La capacidad humana para alterar y destruir sistemas tobáceos ha quedado plenamente demostrada en periodo histórico, pero para las comunidades prehistóricas no hay evidencias directas entre actividad antrópica y degradación de sistemas tobáceos, debido a la dificultad de discriminar los factores antrópicos y los naturales en los cambios ambientales que afectaron durante el Holoceno a estos sistemas (Baker & Simms 1998). Por otro lado, la mineralogía del sedimento puede ser representativa de las condiciones ambientales del lugar y del momento de formación de las tobas, siendo empleados tanto la característica geoquímica de ciertos elementos traza, como los valores de los isótopos estables de C y O a modo de indicadores paleoambientales (Pentecost 2005).

- **Función de registro geológico y paleontológico:** en las formaciones tobáceas se produce un proceso de fosilización muy rápido. La precipitación de carbonato reproduce fielmente los tallos, hojas y sistemas reproductivos de briofitos, helechos y del resto de plantas que coexisten en este tipo de hábitat. También es muy frecuente encontrar fosilizadas hojas y piñas de los árboles del entorno inmediato. En otras palabras, constituyen un medio sedimentario que es un excelente conservador de improntas vegetales de frutos, tallos, raíces y hojas (tanto de plantas vasculares como de briofitos y algas caráceas), esenciales para la comprensión paleobiológica y paleogeográfica de diversas especies (Alexandrowicz 2013; García-Amorena *et al.* 2011; Pérez-González & Virgili 1971). El registro malacológico de las tobas y travertinos suele ser empleado para elaborar reconstrucciones paleoambientales. A escala microscópica, la petrología de las distintas fábricas alberga improntas de larvas de insectos quironómidos (Carthew *et al.* 2006) y bacterias, accesibles estas últimas al estudio mediante la microscopía electrónica (Santos *et al.* 2010). Cabe mencionar también la riqueza polínica que llegan a ofrecer estos sedimentos, siendo empleados los espectros específicos de polen como otro indicador indirecto paleoambiental (Burjach & Juliá 1994; Gedda 2006; Schulte *et al.* 2008), complementario a los petrológicos y geoquímicos, aunque la calidad de preservación sea desigual en función del tipo de facies o de ambiente sedimentario y esté sujeta a la destrucción por diagénesis (Taylor *et al.* 1998).
- **Función cultural:** está relacionada con los valores culturales y recreacionales que las tobas tienen y han tenido a lo largo de la historia. Las formaciones tobáceas forman parte de la herencia cultural del ser humano, quedando patente en poemas, novelas, mitos, canciones y otras manifestaciones artísticas. Son muy frecuentes en España los topónimos relacionados con los vocablos la toba, tobilla, tubilla, el tobar, tobares, toboso, etc., aunque no todos ellos se refieran a formaciones tobáceas. Son también ejemplo de la dimensión cultural y social de las tobas y travertinos los cultivos de regadío de origen musulmán desarrollados sobre edificios tobáceos fácilmente roturables. En España estos paisajes culturales de regadío fueron estudiados por autores clásicos como Jean Bruhnes (1902) pero están siendo objeto de reciente inventario, descripción y valoración por parte de instituciones como la Confederación Hidrográfica del Júcar, en cuya cuenca se encuentran muchos de los regadíos mejor conservados del país, antiguos



molinos, azudes y sistemas de canalización y acequias labrados sobre tobas (Hermosilla Pla 2007, 2008, 2009, 2010). En este sentido destacan los estudios científicos realizados en edificios travertínicos recientes a partir de acequias, como en Baños de Alicún (Granada; Díaz-Hernández *et al.* 2000). Pero hay otros elementos adicionales de los paisajes culturales que ponen de manifiesto las intensas relaciones entre la geología y las sociedades que los habitan y, en este caso, entre las particularidades de los sistemas tobáceos y sus comunidades sociales. Ejemplo de ello son las casas trogloditas y bodegas excavadas en deleznables limos limitados a techo por estratos cementados muy competentes como en Priego (Cuenca), las tradiciones religiosas y festivas relacionadas con el agua y las ermitas y santuarios ubicados en estos entornos, las representaciones artísticas de los emplazamientos de los pueblos o incluso la incidencia y prevalencia de enfermedades renales producidas por la carga iónica del agua en estos lugares. Cabe mencionar que los núcleos de población ubicados en las cercanías de estos sistemas, han proporcionado la experiencia de procesos morfodinámicos activos y rápidos como subsidencias, colapsos, desprendimientos o inundaciones. A este respecto, en el siglo XVIII el monje italiano Alberto Fortis (1778) describía las tobas del río croata Krka, cerca de Sibenik, esclareciendo los procesos involucrados en su formación. La importancia de la experiencia de Fortis en la comprensión de los procesos de agradación de este tipo de sistemas en la Historia Natural en este siglo ha sido recogida por (Suric *et al.* 2007). Contemporáneo al abad Alberto Fortis, en Valencia, fue Cavanilles (1795), otro abad ilustrado (Mateu 2004; Mestre 1997), realizaba asombrosas observaciones sobre los procesos de calcificación del agua en los pueblos ubicados sobre los principales edificios tobáceos activos de lo que hoy es la Comunitat Valenciana.

3. EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO 'ESTRUCTURA Y FUNCIÓN'

3.1. A escala local

Las formaciones tobáceas y travertinos están condicionadas por una serie de factores físico-químicos y biológicos en los cuales son fundamentales las condiciones ambientales. Las variaciones en la temperatura media anual, en el volumen y forma de precipitaciones, la recarga de agua subterránea y la tasa de bicarbonato o incluso en la insolación tienen reflejo en estos tipos de hábitat, que son particularmente sensibles a estos cambios. Sea el mecanismo que sea el que participa o condiciona en mayor medida la precipitación del carbonato, y en la actividad del tipo de hábitat se requiere aguas limpias que favorezcan la insolación y sin sedimentos o partículas en suspensión que puedan degradar o eliminar los biofilms y las superficies biológicas de las formaciones higrófilas incrustantes. A la hora de valorar el estado de conservación es importante discriminar el papel que juega la participación antrópica en los cambios.

Para la estimación de las tasas de precipitación es necesario realizar el control de la superficie activa de los travertinos y tobas funcionales. Las modificaciones en la red de drenaje, en el caudal de los manantiales, en los usos del suelo o en el propio sistema tobáceo pueden provocar que deje de ser funcional o que se pierda parte de su frente activo.

La estimación de la tasa de precipitación requiere el uso de instrumentación más o menos sofisticada, pero también se pueden establecer sistemas de medida muy simples, como la instalación de elementos



o niveles guía para establecer su tasa de recubrimiento por carbonato en un determinado periodo de tiempo.

En el caso de depósitos inactivos, el seguimiento del estado de conservación viene dado por el adecuado mantenimiento de los afloramientos, si bien la colonización vegetal, erosión y karstificación son procesos que forman parte de su evolución natural.

En términos generales, la elevada fragilidad de las formaciones tobáceas viene definida, fundamentalmente, por: (i) su sensibilidad a los cambios ambientales que es extrema, de manera que son muy vulnerables durante las frases secas, de sequía extrema y/o frías. De hecho, los cambios en la temperatura afectan a casi todos los procesos físico-químicos que controlan la precipitación y tienen una dependencia directa de estas variables climáticas; (ii) también en relación con el clima, requieren abundantes precipitaciones capaces de disolver los carbonatos de los sustratos calizos y dolomíticos durante el almacenamiento y asegurar los caudales de los flujos subterráneos; (iii) originan rocas en general poco resistentes a la erosión, lo que sumado a su potencialidad para ser disueltas hace que las formaciones tobáceas sean habitualmente eliminadas del registro geológico o que sean destruidas incluso antes de formar parte de él; (iv) requieren unas condiciones de calidad del agua, escasa turbidez y adecuada insolación que pueden cambiar rápidamente. Su vinculación directa al agua, sobre todo subterránea, y su desarrollo en función de la cantidad y calidad de agua presente les hace medios muy vulnerables y muy sensibles al cambio climático.

Las tobas calcáreas funcionales poseen características que hacen que su vulnerabilidad sea aún mayor que en las inactivas o las ya incluidas en el registro sedimentario, pues no solo es necesario que no se vean afectadas por alguna incidencia directa, sino que también requieren que se mantengan las condiciones de la cuenca o acuífero que condicionan su formación. Por un lado, la eficacia de los procesos de disolución requiere cantidades importantes de CO₂ disuelto en agua, que procede en su mayoría de las formaciones edáficas donde tiene lugar la oxidación y putrefacción de la materia orgánica (el atmosférico no es suficiente). Por otro lado, la vegetación acuática también es esencial y, a su vez, requiere caudales más o menos continuos donde no sean frecuentes los procesos de avenidas, exista una buena luminosidad que favorezca la fotosíntesis, predomine una notable fitoestabilización de las laderas (que impida la llegada de terrígenos a los flujos que impiden la precipitación química y afectan a las especies hidrófilas), y tengan una nula o baja contaminación (sobre todo en el caso de cauces fluviales o tobas fluvio-lacustres), a la que son muy sensibles las plantas acuáticas y que provoca la alteración del equilibrio químico que induce la precipitación del carbonato cálcico. Así que cambios naturales, como oscilaciones climáticas, pero también antrópicos, como la contaminación, pueden afectar a las formaciones tobáceas o hacerlas desaparecer.

La evaluación de la estructura y la función de estos tipos de hábitat es fundamental para determinar su estado de conservación. Para la evaluación de la estructura y función de las formaciones tobáceas se establecen una serie de factores que han de ser determinados. Estos se refieren tanto a factores intrínsecos (Tabla 1), como a factores extrínsecos (Tabla 2). Los factores extrínsecos se corresponden en su mayoría con presiones que pueden afectar a la viabilidad de los tipos de hábitat, tanto de manera directa como de manera indirecta. En general, los factores extrínsecos son más fácilmente identificables en el campo *de visu*, mientras que la determinación de los factores intrínsecos requiere la toma de muestras y la aplicación de metodologías analíticas en laboratorio. Existe una relación entre ambos tipos de factores, de modo que, en algunos casos, los factores intrínsecos son variables diagnósticas del estado de los factores extrínsecos. En la Tabla 3 se muestra la relación existente entre ambos tipos de



factores, o lo que es lo mismo, en qué medida la presencia de presiones afecta a cada uno de los factores intrínsecos considerados. Se emplea el código '1' en los casos en los que hay relación entre ambos parámetros; el código '0' cuando no hay relación. Es destacable el hecho de que el estado de conocimiento actual todavía es insuficiente para esclarecer de manera unívoca la relación entre parte de los factores considerados. Por último, en la Tabla 4 se indican los valores para determinar el estado de conservación del parámetro 'Estructura y función' en las categorías de 'óptimo', 'subóptimo' y 'muy malo'.

Tabla 1 Determinación del estado de conservación del parámetro 'Estructura y función'. Factores intrínsecos. Fuente: elaboración propia.

Nota: Tipo de parámetro: métrico (m), semicuantitativo (sc), cualitativo (c); Significado: estructural (e), funcional (f); Grado de obligatoriedad: obligatorio (o), opcional (op); Intervalo de medición: estacional (e - 4 veces por año), anual (a), bianual (ba), ocasional (o - campañas específicas fuera de calendario con objetivos de caracterización global); Tipo de muestreo: puntual (p), transecto (t), aleatorio (a).

		Tipo de parámetro	Significado	Grado de obligatoriedad	Intervalo de medición	Tipo de muestreo	
Factores intrínsecos	Propiedades de la formación tobácea	Tasa de precipitación anual	m	e	o	ba	p
		Grado de colonización vegetal del edificio	m	e	o	ba	t
		Superficie de la parte activa	m	e	o	ba	t
	Propiedades y composición del agua	Turbidez del agua	m	f	o	ba	p
		pH y conductividad del agua	m	f	o	ba	p
		Cambios en el volumen y regularidad de los caudales	m	f	o	ba	p
		Contenido en bicarbonato	m	f	o	ba	p
		Contenido en sulfatos	m	f	o	ba	p
		Temperatura del agua	m	f	op	ba	p
		Contenido en nitratos	m	f	o	ba	p
		Contenido en fosfato	m	f	o	ba	p
	Propiedades biológicas	Superficie recubierta o grado de cobertura vegetal	m	e	o	ba	t
		Presencia de cianobacterias y diatomeas	m	e	op	ba	p
		Presencia de especies invasoras	m	e	o	ba	t
		Presencia de especies indicadoras de buena calidad del tipo de hábitat	m	e	o	ba	t



Tabla 2 Determinación del estado de conservación del parámetro 'Estructura y función'. Factores extrínsecos.

Fuente: elaboración propia.

Nota: Tipo de parámetro: métrico (m), semicuantitativo (sc), cualitativo (c); Significado: estructural (e), funcional (f); Grado de obligatoriedad: obligatorio (o), opcional (op); Intervalo de medición: estacional (e - 4 veces por año), anual (a), bianual (ba), ocasional (o - campañas específicas fuera de calendario con objetivos de caracterización global); Tipo de muestreo: puntual (p), transecto (t), aleatorio (a).

		Tipo de parámetro	Significado	Grado de obligatoriedad	Intervalo de medición		
Factores extrínsecos	Efectos directos	Cambios en el drenaje (caudal)	sc	e	o	ba	
		Cubierta vegetal y transformación de la vegetación	sc	e	o	ba	
		Extracción de toba para piedra ornamental	sc	e	o	ba	
		Incendios	c	f	op	ba	
		Ocupación con infraestructuras	c	e	o	ba	
		Modificación con infraestructuras	c	e	o	ba	
		Afección por uso público (barranquismo, pisoteo por senderismo, baño, etc.)	c	e	o	ba	
		Vertidos directos en el agua	c	f	o	ba	
		Vertidos de residuos sólidos	c	f	o	ba	
		Captaciones de agua	c	f	o	ba	
		Fertilizantes, plásticos y uso de pesticidas	c	f	op	ba	
	Efectos indirectos	Vía atmósfera	Contaminación atmosférica	c	f	op	p
			Cambio climático inducido	sc	f	op	p
			Cambios en la precipitación media anual	c	f	o	ba
			Cambios en la insolación	c	f	op	p
			Cambios en la temperatura media anual	c	f	o	ba
		Vía cuenca	Modificaciones del régimen hidrológico de la cuenca	sc	f	op	p
			Contaminación del agua	c	f	o	ba
			Erosión en suelos de la cuenca	sc	f	op	p
			Deforestación y cambios de uso del suelo en la cuenca	sc	f	op	p
Desconocimiento y falta de información		-	f	-	-		



Tabla 3 Relación entre los factores intrínsecos y extrínsecos. Fuente: elaboración propia.

Nota: relación entre los factores: 1= hay relación; 0= no hay relación aparente.

		Factores extrínsecos																				
		Efectos directos											Efectos indirectos							-		
													Vía atmósfera				Vía cuenca					
													Contaminación atmosférica	Cambio climático inducido	Cambios en la precipitación media anual	Cambios en la insolación	Cambios en la temperatura media anual	Modificaciones del régimen hidrológico de la cuenca	Contaminación del agua		Deforestación y cambios de uso del suelo en la cuenca	Desconocimiento y falta de información
		Cambios en el drenaje (caudal)	Cubierta vegetal y transformación de la vegetación	Extracción de toba	Incendios	Ocupación con infraestructuras	Modificación con infraestructuras	Afección por uso público (barranquismo, baño, etc.)	Vertidos en el agua	Vertidos de residuos sólidos	Captaciones de agua	Fertilizantes y uso de pesticidas										
Factores intrínsecos	Propiedades de la formación tobácea	Tasa de precipitación anual	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
		Grado de colonización vegetal del edificio	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
		Superficie de la parte activa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	Propiedades y composición del agua	Turbidez del agua	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
		pH del agua	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
		Cambios en el volumen y regularidad de los caudales	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0
		Contenido en bicarbonato	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
		Contenido en sulfatos	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
		Temperatura del agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
Contenido en nitratos	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0		
Contenido en fosfato	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0		

Continúa en la siguiente página ►



		Factores extrínsecos																			
		Efectos directos											Efectos indirectos								-
													Vía atmósfera				Vía cuenca				
		Cambios en el drenaje (caudal)	Cubierta vegetal y transformación de la vegetación	Extracción de toba	Incendios	Ocupación con infraestructuras	Modificación con infraestructuras	Afección por uso público (barranquismo, baño, etc.)	Vertidos en el agua	Vertidos de residuos sólidos	Captaciones de agua	Fertilizantes y uso de pesticidas	Contaminación atmosférica	Cambio climático inducido	Cambios en la precipitación media anual	Cambios en la insolación	Cambios en la temperatura media anual	Modificaciones del régimen hidrológico de la cuenca	Contaminación del agua	Deforestación y cambios de uso del suelo en la cuenca	
Propiedades biológicas	Superficie recubierta o grado de cobertura vegetal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	
	Presencia de cianobacterias y diatomeas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	
	Presencia de especies invasoras	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
	Presencia de especies indicadoras de buena calidad del tipo de hábitat	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	



Tabla 4 Valores para determinar el estado de conservación del parámetro 'Estructura y función'. Fuente: elaboración propia.

		Óptimo	Subóptimo	Malo	
Efectos directos	Cambios en el drenaje (caudal)	Sin cambios o recuperación de caudales previos		Con pérdida de caudal	
	Cubierta vegetal y transformación de la vegetación	Sin cambios o recuperación		Pérdida de cubierta vegetal	
	Extracción de toba para piedra ornamental	Ausente	Presente en zona no activa	Presente	
	Incendios	No		Sí	
	Ocupación con infraestructuras	No		Sí	
	Modificación con infraestructuras	No		Sí	
	Afección por uso público (barranquismo, pisoteo por senderismo, baño, etc.)	No		Sí	
	Vertidos directos en el agua	No		Sí	
	Vertidos de residuos sólidos	No		Sí	
	Captaciones de agua	No	Sí pero no muy significativas	Sí	
Fertilizantes, plásticos y uso de pesticidas	No	-	Sí		
Efectos indirectos	Vía atmósfera	Contaminación atmosférica	Sin incidencia evidente	-	Afecta al agua y a la vegetación
		Cambio climático inducido	Sin incidencia evidente	-	Afecta al agua y a la vegetación
		Cambios en la precipitación media anual	Reducción de mayor del 20%	-	Reducción mayor del 30%
		Cambios en la insolación	Reducción de mayor del 20%	-	Reducción mayor del 30%
		Cambios en la temperatura media anual	Reducción de mayor del 20%	-	Reducción mayor del 30%
	Vía cuenca	Modificaciones del régimen hidrológico de la cuenca	No	-	Sí
		Contaminación del agua	No	-	Sí
		Erosión en suelos de la cuenca	Sin cambios o reducción	-	Aumento
	Deforestación y cambios de uso del suelo en la cuenca	Sin cambios o reducción	-	Aumento	
	Desconocimiento y falta de información	-	-	-	



3.1.1. Factores extrínsecos

Los factores extrínsecos con efectos directos sobre las formaciones tobáceas son los siguientes:

- **Cambios en el drenaje (caudal):** las formaciones tobáceas son tipos de hábitat acuáticos continentales, por lo tanto, las modificaciones del sistema hidrológico afectan de manera directa y, en ocasiones, son irreversibles, a su naturaleza. Están sujetas a ciclos naturales en los que su estado hídrico puede verse modificado. Pequeños cambios en la hidrología son suficientes para producir modificaciones en las tasas de precipitación del carbonato cálcico, en el dinamismo del sistema y en las comunidades vegetales. Sin embargo, cuando el drenaje se altera de manera severa como consecuencia de la acción antrópica, los daños pueden ser irreversibles. Por ello, dentro de las acciones de seguimiento del estado de conservación se evaluará prioritariamente si ha habido modificaciones del sistema hidrológico directamente relacionado con este tipo de hábitat.
- **Cubierta vegetal y transformación de la vegetación:** la participación de la vegetación, algas y bacterias en la formación de las tobas calcáreas es fundamental en casi todos los casos descritos. Por ello, las modificaciones en la biota suponen cambios directos las formaciones tobáceas. Por otro lado, pueden definirse especies que sean indicadoras de buena calidad del tipo de hábitat y otras de mala calidad por ser especies invasoras, de manera que la revisión de las especies presentes es también un buen indicador de calidad del tipo de hábitat. Así, es necesario determinar la superficie de la formación cubierta por vegetación ligada al tipo de hábitat. Es fundamental la elaboración de inventarios botánicos que permitan discernir las especies indicadoras de la calidad del tipo de hábitat. De manera más concreta, la cubierta vegetal suministra abundante CO_2 a las agua, lo que facilita un incremento en la carga iónica en carbonatos (González-Martín & González-Amuchastegui 2014). También fitoestabilizan vertientes, laderas, cauces y humedales, frenando la llegada de terrígenos.
- **Extracción de toba fósil:** la extracción de toba fósil que se transforma en una roca sedimentaria, se ha realizado generalmente para su uso en construcción por su capacidad aislante, poco peso y facilidad para ser trabajada. Rara vez se realiza en una zona activa, pero sí existen ejemplos como el de Cívica (Guadalajara), donde más que extracción lo que se produjo fue una utilización del armazón pétreo para la excavación de viviendas.
- **Incendios:** se trata de incendios forestales que afecten directamente o a las cuencas de drenaje en las que se ubiquen formaciones tobáceas. Los fuegos afectan a los suelos que enriquecen el agua de carbonato cálcico, incrementan la erosión difusa y concentrada, incrementan la turbidez del agua por la llegada de sedimentos y cenizas y, por supuesto, afectan a las especies vegetales presentes y a la calidad del agua.
- **Ocupación con infraestructuras:** la ocupación de los tipos de hábitat de formaciones tobáceas con infraestructuras como carreteras, aerogeneradores, etc., puede suponer intensas modificaciones de la circulación hidrológica, favoreciendo su desecación y, por lo tanto, afectando a la biodiversidad. Como se ha comentado en el caso de la extracción de toba, las grandes formaciones tobáceas en España, frecuentemente, están afectadas con infraestructuras que impactan sobre su dinámica natural.



- **Modificación con infraestructuras:** en este caso se trata de la instalación, en muchos casos turísticas, como campings, de infraestructuras como pasarelas, miradores, tarimas, etc. que pueden afectar a la dinámica natural del tipo de hábitat, incluyendo el caudal y escorrentía dentro de la formación tobácea, la presencia de saltos de agua (eliminados o incrementados) y las condiciones de insolación.
- **Afección por uso público:** muchas formaciones tobáceas dan lugar a represas y cascadas que son objeto de visita tanto para actividades lúdicas (baño, senderismo, por ejemplo) como deportivas (descenso de barrancos, por ejemplo). El pisoteo, la contaminación por basuras sobre todo plásticos, las modificaciones de caudal y la instalación de infraestructuras (escaleras, descuelgues, etc.) provocan cambios en la dinámica del sistema y en la vegetación asociada.
- **Vertidos en el agua:** vertidos de líquidos contaminantes o incluso trasvases de aguas de diferente composición que cambian drásticamente la hidroquímica del agua, lo que afecta directamente a la precipitación del carbonato cálcico y a las especies vegetales asociadas a las formaciones tobáceas.
- **Vertidos de residuos sólidos:** al margen de que puedan afectar a la composición química del agua, implican una variación en la turbidez y en los materiales en suspensión, lo que afecta al proceso de precipitación del carbonato cálcico y de la biota.
- **Captaciones de agua:** son muy frecuentes las captaciones de agua, sobre todo en surgencias kársticas, como ocurrió en Covalagua (Palencia). Dependiendo del volumen captado y de las infraestructuras creadas para la misma, pueden suponer una modificación importante del tipo de hábitat, pues se han dado casos de una desecación total de la formación tobácea. Si la captación no es muy importante, puede suponer una modificación a evitar pero no implica la degradación total del tipo de hábitat.
- **Fertilizantes, plásticos y usos de pesticidas:** el uso de fertilizantes altera los valores y contenidos del agua en N, P, S y K, además del pH del agua, lo que supone una modificación importante de las variables hidroquímicas que condicionan el tipo de hábitat. Otra variable a estimar en la actualidad es la presencia de microplásticos en las aguas subterráneas y superficiales, para estimar la influencia de estos contaminantes tanto en la precipitación y disolución del carbonato, como en la biodiversidad de este tipo de hábitat.

Los factores extrínsecos con efectos indirectos sobre las tobas vía atmósfera incluyen:

- **Contaminación atmosférica:** la principal afección se refiere a las especies vegetales que forman parte del tipo de hábitat, en especial si están muy cerca de focos emisores.
- **Cambio climático inducido:** el clima es uno de los principales factores que influyen en la formación, distribución y dinámica de los ecosistemas de toba, por lo que es presumible que el cambio climático inducido tendrá un efecto sobre estos tipos de hábitat. Los cambios se pueden referir a modificaciones en los patrones de precipitación y en la acentuación de la aridez, influencia en la recarga de los acuíferos, etc.



- **Cambios en la precipitación media anual:** la recarga de los acuíferos que alimentan las surgencias kársticas y el propio caudal de los ríos y profundidad de la lámina de agua de las zonas lacustres y palustres dependen directamente de las precipitaciones. Un indicador puede ser la precipitación media anual, aunque también es importante la manera en la que se distribuye dicha precipitación, pues su influencia sobre la formación tobácea es diferente, acentuando procesos de erosión, provocando una mayor precipitación, etc.
- **Cambios en la insolación:** la radiación solar es un factor que influye en la reacción química por la que se produce la precipitación química del carbonato cálcico. De manera que la radiación solar es un factor que también condiciona el desarrollo de las formaciones tobáceas. Cambios sustanciales en la misma pueden provocar modificaciones en la dinámica del tipo de hábitat. La insolación condiciona de manera directa la diversidad de especies de los grupos taxonómicos alojados en el agua, que condiciona el desarrollo de diferentes facies tobáceas (González-Martín & González-Amuchastegui 2014).
- **Cambios en la temperatura media anual:** de la misma manera que los dos factores anteriores, la temperatura influye en la reacción química, el número de días que este tipo de hábitat está activo y en la vegetación que coloniza las formaciones tobáceas, de manera que es un factor que influye de manera directa en la evolución del tipo de hábitat.

Las formaciones tobáceas son susceptibles de recibir sedimentos, material edáfico y agua de la cuenca de drenaje. Así, para este tipo de hábitat los factores extrínsecos con efectos indirectos sobre estos vía cuenca son los siguientes:

- **Modificaciones del régimen hidrológico de la cuenca:** debido a la dependencia del agua de este ecosistema, modificaciones del régimen hidrológico (subterráneo y superficial) de la cuenca pueden suponer afecciones importantes a su propio estado hídrico.
- **Contaminación del agua:** la contaminación no solo se refiere al vertido de sustancias químicas nocivas, sino también a la mezcla artificial de aguas de diferente composición que afectan a sus características hidroquímicas e inciden directamente en la precipitación de carbonato.
- **Erosión de suelos en la cuenca:** la erosión de los suelos de la cuenca, además de aumentar la carga de material inorgánico, frecuentemente supone una entrada de nutrientes afectando a las comunidades vegetales, animales y microbianas. Además, incrementa la turbidez y la carga en suspensión de partículas, lo que influye en la precipitación del carbonato cálcico.
- **Deforestación y cambios de uso en la cuenca:** la deforestación y el cambio de uso de los suelos de la cuenca pueden aumentar la escorrentía superficial y la erosión provocando modificaciones del régimen hidrológico.
- **Desconocimiento y falta de información:** la falta de información sobre algunos de los procesos que participan en la formación de las tobas y, sobre todo, sobre las comunidades vegetales y otros organismos que las colonizan tienen una relación indirecta con su conservación, pues se pueden desarrollar prácticas perjudiciales para el desarrollo de las formaciones tobáceas.



3.1.2. Factores intrínsecos

Para evaluar el estado de conservación de las formaciones tobáceas, es esencial la determinación de las propiedades de la propia formación tobácea, del agua y de la biodiversidad. Por ello, los factores intrínsecos que condicionan su conservación han sido ordenados según esas tres grandes categorías.

■ **Propiedades de la formación tobácea**

- **Tasa de precipitación anual:** la formación tobácea está directamente relacionada con la precipitación bioinducida del carbonato cálcico disuelto en el agua. La tasa de precipitación anual es el principal indicador de calidad del tipo de hábitat, pues marca el grado de dinamismo del mismo y los cambios que se realicen a escala local y a nivel de cuenca influyen en su valor. También influyen variables climáticas, de manera que debe tenerse en cuenta el resultado. Las tasas de precipitación son muy variables en cada caso (es difícil establecer unas tasas uniformes para todos los casos), aunque a modo de referencia, oscilan entre 1 y 3 mm/año para barreras tobáceas y entre 3 y 4 cm/año para cascadas asociadas a surgencias.
- **Grado de colonización vegetal:** tanto en la parte activa como en la inactiva, el grado de cubierta vegetal es un indicador de calidad del tipo de hábitat, porque dicha cubierta vegetal se relaciona de manera directa con la precipitación de carbonato cálcico.
- **Superficie de la zona activa:** la zona activa es más importante a nivel de tipo de hábitat. Por lo tanto, la extensión que ocupe (en relación con la existencia de vegetación típica y de caudales de agua) es un indicador del estado de conservación del tipo de hábitat.

■ **Propiedades del agua**

- **Turbidez del agua:** la llegada de sedimentos en suspensión en el agua aumenta la turbidez que disminuye la eficacia de los procesos fotosintéticos e incluso pueden llegar a provocar la abrasión y erosión de los tapices algo-bacterianos y organismos higrófilos (González-Martín & González-Amuchastegui 2014).
- **pH del agua:** el pH y la carga iónica del agua constituyen uno de los principales condicionantes para el desarrollo de las formaciones tobáceas (González-Martín & González-Amuchastegui 2014).
- **Cambios en el volumen y regularidad de los caudales:** la regularidad de los caudales asegura la formación continuada de la vegetación y la precipitación anual de carbonato cálcico. De manera que para el buen estado de conservación de este tipo de hábitat no solo es necesario un caudal medio anual determinado, sino una regularidad en el mismo de acuerdo con sus características hidrogeológicas.
- **Contenido en bicarbonato:** si disminuye no se produce la sobresaturación en carbonato y no precipitará la calcita por lo que no crecerá el sistema tobáceo.
- **Contenido en sulfatos:** puede ser un inhibidor de la precipitación de carbonato, por lo que altos valores de sulfato impiden la formación de la toba.



- **Temperatura del agua:** la temperatura influye en la reacción química y en la vegetación que coloniza las formaciones tobáceas, de manera que es un factor que influye de manera directa en la evolución del tipo de hábitat.
- **Contenido en nitratos y contenido en fosfatos:** la presencia de nitratos y fosfatos puede eutrofizar el sistema favoreciendo la proliferación de comunidades biológicas que no son típicas del tipo de hábitat.

■ Propiedades biológicas

- **Superficie cubierta o grado de cobertura vegetal:** la cubierta vegetal suministra abundante CO₂ a las aguas, lo que facilita un incremento en la carga iónica en carbonatos (González-Martín & González-Amuchastegui 2014). También fitoestabilizan vertientes, cauces y humedales, paralizando la llegada de terrígenos
- **Presencia de cianobacterias, algas y diatomeas:** sobre todo la presencia de cianobacterias en el agua condiciona la presencia de estromalitos, que son comunidades muy sensibles a los cambios de pH y concentración de bicarbonato, así como a la variación de caudales.
- **Presencia de especies invasoras:** determinadas especies vegetales son claro reflejo de la degradación del tipo de hábitat. Sería esencial determinar el listado de especies que marcan la degeneración del tipo de hábitat, ya sea por cambios provocados por la modificación del caudal, de las condiciones ambientales o de la calidad de las aguas.
- **Presencia de especies indicadoras de buena calidad del tipo de hábitat:** de la misma manera que el factor anterior, es fundamental realizar un listado de las especies que permiten indicar un buen estado de conservación del tipo de hábitat. Este factor, junto con las diferentes morfologías descritas en Carcavilla *et al.* 2019, sería el que llegaría a proponer una diversificación del tipo de hábitat en otros subtipos.



4. REFERENCIAS

- Alexandrowicz W P. 2013. Malacological sequence from profile of calcareous tufa in Gron (Podhale Basin, southern Poland) as an indicator of the Late Glacial/Holocene boundary. *Quaternary International*. 293: 196-206.
- Andrews J. E. 2006. Paleoclimatic records from stable isotopes in riverine tufas: synthesis and reviews. *Earth Science Reviews*. 75: 85-104.
- Anzalone E, Ferreri V, Sprovieri M & D'Argenio B. 2007. Travertines as hydrologic archives: the case of the Pontecagnano deposits (southern Italy). *Advances in Water Resources*. 30(10): 2159-2175.
- Arenas C, Sancho C, Vázquez-Urbez M, Pardo G, Hellstrom J, Ortiz J E, Torres T, Cinta M & Auqué L. 2010. Las tobas cuaternarias del río Añamaza (provincia de Soria, Cordillera Ibérica): aproximación cronológica. *Geogaceta*. 49: 51-54.
- Arp G, Bissett A, Brinkmann N, Cousin S, de Beer D, Friedl T, Mohr K I, Neu T R, Reimer A, Shiraishi F, Stackebrandt E & Zippel B. 2010. Tufa-forming biofilms of German Karstwater streams: microorganisms, exopolymers, hydrochemistry and calcification. pp. 83-118. In: Pedley H M & Rogerson M (eds.) *Tufas and Speleothems: Unravelling the Microbial and Physical Controls*. Geological Society, London.
- Arp G, Wedemeyer N & Reitner J. 2001. Fluvial tufa formation in a hard-water creek (Deinschwanger Bach, Franconian Alb, Germany). *Facies*. 44: 1-22.
- Baker A & Simms M J. 1998. Active deposition of calcareous tufa in Wessex, UK, and its implications for the 'late-Holocene tufa decline'. *The Holocene* 8(3): 359-365.
- Barnes I. 1965. Geochemistry of Birch Creek, Inyo Co., California; a travertine-depositing creek in an arid climate. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 29: 85-112.
- Basso D. 2012. Carbonate production by calcareous red algae and global change. *Geodiversitas*. 34(1): 13-33.
- Bischoff J L, Juliá R & Mora R. 1988. Uranium-series dating of Mousterian occupation at Abric Romani, Spain. *Nature*. 332: 68-70.
- Burjach F & Juliá R. 1994. Abrupt climatic changes during the last glaciation based on pollen analysis of the Abric-Romani Catalonia, Spain. *Quaternary Research*. 42(3): 308-315.
- Cavanilles A J. 1995. Observaciones sobre la Historia Natural, Geografía, Agricultura, población y frutos del Reyno de Valencia (1795-97). En: Lacarra J, Sánchez X & Jarque F (eds.) *Las Observaciones de Cavanilles. Doscientos años después*. Bancaja, Obra Social, Valencia, 199 pp.
- Carcavilla L, Vegas J & Cabrera A M. 2019. Establecimiento de una tipología específica de formaciones tobáceas. Serie "Metodologías para el seguimiento del estado de conservación de los tipos de hábitat". Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid. 20 pp.
- Carthew K D, Taylor M P & Drysdale R N. 2006. An environmental model of the fluvial tufas of the seasonally humid tropics, northern Australia. *Geomorphology*. 73(1): 78-100.
- Dandurand J L, Gout R, Hoefs J, Menschel G, Schott J & Usdowski E. 1982. Kinetically controlled variations of major components and carbon and oxygen isotopes in a calcite-depositing spring. *Chemical Geology*. 36: 299-31.



- Díaz-Hernández J L, Martín M & Julia R. 2000. Depósitos travertínicos de Alicún (Depresión de Guadix, Granada: S España). *Geogaceta*. 28: 35-38.
- Durán J J. 1989. Geocronología de los depósitos asociados al karst en España. pp. 243-256. En: Durán J J & López-Martínez J (eds.) *El karst en España*. Monografías nº 4. Sociedad Española de Geomorfología. Madrid.
- Eikenberg J, Vezzu G, Zumsteg I, Bajo S, Ruethi M & Wyssling G. 2001. Precise two chronometer dating of Pleistocene travertine: the $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and $^{226}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}(0)$ approach. *Quaternary Science Reviews*. 20: 1935-1953.
- Frank N, Braum M, Hambach U, Mangini A & Wagner G. 2000. Warm period growth of travertine during the last interglaciation in southern Germany. *Quaternary Research*. 54: 38-48.
- García del Cura M Á, Benavente D, Martínez-Martínez J & Cueto N. 2012. Sedimentary structures and physical properties of travertine and carbonate tufa building stone. *Construction and Building Materials*. 28: 456-467.
- García-Amorena I, Rubiales J M, Moreno-Amat E, Iglesias R & Gómez-Manzanares F. 2011. New macrofossil evidence of *Pinus nigra* Arnold on the Northern Iberian Meseta during the Holocene. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 163: 281-288.
- Garnett E R, Gilmour M A, Rowe P J, Andrews J E & Preece R C. 2004. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating of Holocene tufas: possibilities and problems. *Quaternary Science Reviews*. 23: 947-958.
- Gedda B. 2006. Terrestrial mollusc succession and stratigraphy of a Holocene calcareous tufa deposit from the Fyledalen valley, southern Sweden. *The Holocene*. 16(1): 137-147.
- Golubic S. 1973. The relationship between blue-green algae and carbonate deposits. pp. 434-472 In: Carr N G & Whitton B A (eds.) *The Biology of Blue-green Algae*. Blackwell, Oxford.
- González-Martín J A & González-Amuchastegui M J. 2014. Las acumulaciones tobáceas. pp. 3-18. En: González-Martín J A & González-Amuchastegui M J (eds.) *Las tobas en España*. Sociedad Española de Geomorfología.
- Hennig G J, Grün R & Brunacker K. 1983. Speleothems, travertines and paleoclimates. *Quaternary Research*. 20: 1-29.
- Hermosilla Pla J. 2007. Los paisajes de regadío en el Alto Palancia. Sistemas y elementos hidráulicos. Direcció General de Patrimoni Cultural Valencia. Conselleria de Cultura i Educació. Generalitat Valenciana. Valencia.
- Hermosilla Pla J. 2008. Las vegas tradicionales del alto Turia. Sistemas y paisajes de regadío. Colección Regadíos Históricos Valencianos. Edit. Direcció General de Patrimoni Cultural Valencia - Generalitat Valenciana - Universitat de Valencia. Valencia.
- Hermosilla Pla J. 2009. Los regados históricos del Turia medio: la Serrana y el Camp de Turia. Colección Regadíos Históricos Valencianos. Vol. 11. Edit. Conselleria de Cultura Educació i Esport - Generalitat Valenciana. Valencia.
- Hermosilla Pla J. 2010. Los regadíos históricos españoles. Paisajes culturales, paisajes sostenibles. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 605 pp.



- Horowitz A. 1989. Palynological evidence for the Quaternary rates of accumulation along the Dead Sea Rift, and structural implications. *Tectonophysics*. 164: 63-71.
- Horvatinčić N, Calic R & Geyh M A. 2000. Interglacial growth of tufa in Croatia. *Quaternary Research*. 53: 185-195.
- Huerta P, Armenteros I, Merino-Tomé O, Silva P G, Rodríguez-González G, González-Aguilera P, Carrasco P & Martín-Merino G. 2011. Geometry, evolution and facies distribution of a tufa phytoherm. La Peña del Manto (Soria, Spain). In: Bádenas B, Aurell M & Alonso-Zarza A M (eds.) Abstracts, 28th IAS Meeting of Sedimentology. Zaragoza. 118 pp.
- Kennedy H, Beggins J, Duarte C M, Fourqurean J W, Holmer M, Marbà N & Middelburg J J. 2010. Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*. 24: GB4026.
- Lilliestam J, Bielicki J & Patt A. 2012. Comparing carbon capture and storage (CCS) with concentrating solar power (CSP): Potentials, costs, risks, and barriers. *Energy Policy*. 47: 447-455.
- Mallick R & Frank N. 2002. A new technique for precise uranium-series dating of travertine micro-samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 66(22): 4261-4272.
- Marín-Magaz J C. 2007. El hombre y el agua de las Lagunas de Ruidera. Usos históricos, siglos XVI a mediados del XX. Ediciones Soubriet, Tomelloso. 386 pp.
- Mateu M. 2004. Las campañas viajeras de A.J. Cavanilles por el Reyno de Valencia (1791-1793) en su producción científica y literaria. PP. 169-200. En: Cavanilles A J (1745-1804). Segundo centenario de la muerte de un gran botánico (VV.AA.). Real Sociedad Económica de Amigos del País, Valencia.
- Merz-Preiss M & Riding R. 1999. Cyanobacterial tufa calcification in two freshwater streams: ambient environment, chemical thresholds and biological processes. *Sedimentary Geology*. 126: 103-124.
- Mestre A. 1997. Cavanilles y los ilustrados valencianos. *Cuadernos de Geografía*. 62: 205-222.
- Nga C C, Huangb W C, Changc C C, Tzeng W S, Chena T W, Liua Y S & Shyua Y T. 2006. Tufa microbial diversity revealed by 16S rRNA cloning in Taroko National Park, Taiwan. *Soil Biology and Biochemistry*. 38(2): 342-348.
- Ordoñez S, González-Martín J A, García del Cura M A & Pedley M. 2005. Temperate and semi-arid tufas in the Pleistocene to recent fluvial barrage system in the mediterranean area: the Ruidera lakes natural park (central Spain). *Geomorphology*. 69(1): 332-350.
- Ortiz J E, Torres T, Delgado A, Reyes E & Díaz-Bautista A. 2009. A review of the Tagus river tufa deposits (central Spain): age and palaeoenvironmental record. *Quaternary Science Reviews*. 28: 947-963.
- Pentecost A. 2005. Travertine. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany. 445 pp.
- Pérez-González A & Virgili C. 1971. Las terrazas travertínicas de Priego (Cuenca). I Centenario de la Real Sociedad Española de Historia Natural. *Real Sociedad Española de Historia Natural*: 347-356.
- Prado-Pérez A J, Aracil E & Pérez del Villar L. 2010. Modelización mediante Técnicas Geoestadísticas de la Formación de Travertinos Asociada al Sistema Termal de Alicún de las Torres a partir de Datos de Tomografía Eléctrica y Porosidad. *Informes Técnicos CIEMAT*, 1211, Madrid. 79 pp.



- Rihs S, Condomines M & Poidevin J L. 2000. Long-term behaviour of continental hydrothermal systems: U-series study of hydrothermal carbonates from the French Massif Central (Allier Valley). *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 64: 3189–3199.
- Santos F, Pena A, Nogales B, Soria-Soria E, García del Cura M A, González-Martin J A & Anton J. 2010. Bacterial diversity in dry modern freshwater stromatolites from Ruidera Pools Natural Park, Spain. *Systematic and applied microbiology*. 33(4): 209-221.
- Schulte L, Julià R, Burjachs F & Hilgers A. 2008. Middle Pleistocene to Holocene geochronology of the River Aguas terrace sequence (Iberian Peninsula): Fluvial response to Mediterranean environmental change. *Geomorphology*. 98: 13–33.
- Shackleton N J & Opdyke N D. 1973. Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and 106 year scale. *Quaternary Research*. 3: 39-55.
- Shiraishi F, Okumura T, Takahashi Y & Kano A. 2010. Influence of microbial photosynthesis on tufa stromatolite formation and ambient water chemistry, SW Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 74: 5289-5304.
- Souza-Egipsy V, Altamirano V, Amils R & Aguilera A. 2011. Photosynthetic performance of phototrophic biofilms in extreme acidic environments. *Environmental Microbiology*. 13(8): 2351-2358.
- Souza-Egipsy V, Garcia del Cura A, Ascaso C & de los Ríos A. 2006. Interaction between calcite and phosphorus in biomineralization processes in tufa carbonates. *International Rev. Hydrobiology*. 91(3): 222-241.
- Souza-Egipsy V, Wierzchos J, Ascaso C & Nealson K H. 2005. Mg-silica precipitation in fossilization mechanisms of sand tufa endolithic microbial community, Mono Lake (California). *Chemical Geology*. 217: 77–87.
- Suric M, Loncaric R, Cuka A & Faricic J. 2007. Geological issues in Alberto Fortis' *Viaggio in Dalmazia* (1774). *Comptes Rendus Geoscience*. 339: 640-650.
- Szabo B J. 1990. Ages of travertine deposits in eastern Grand Canyon National Park, Arizona. *Quaternary Research*. 34: 24-32.
- Takashima C & Kano A. 2008. Microbial processes forming daily lamination in a stromatolitic travertine. *Sedimentary Geology*. 208: 114–119.
- Taylor D M, Pedley H M, Davies P & Wright M W. 1998. Pollen and mollusc records for environmental change in central Spain during the mid- and late Holocene. *The Holocene*. 8: 605-612.
- Vázquez-Urbez M, Arenas C, Sancho C, Cinta M, Auqué L & Pardo G. 2010. Factors controlling present-day tufa dynamics in the Monasterio de Piedra Natural Park (Iberian Range, Spain): depositional environmental settings, sedimentation rates and hydrochemistry. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*. 99: 1027-1049.
- Vázquez-Urbez M, Osácar C, Arenas C, Sancho C & Auqué L. 2005. Variabilidad de la señal isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$) del sistema tobáceo actual del Parque del Monasterio de Piedra (provincia de Zaragoza). *GeoTemas*. 8: 119-123.



Vázquez-Urbez M. 2008. Caracterización y significado ambiental de depósitos tobáceos neógenos de la Cuenca del Ebro. Comparación con ambientes Cuaternarios. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.

Wang X, Auler A S, Edwards R L, Cheng H, Cristalli P S, Smart P L, Richards D A & Shen C C. 2004. Wet periods in northern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature*. 432: 740-743.

Weijemars R, Mulder-Blanken C W & Wieggers J. 1986. Growth rate observations from the moss-built Checa travertine terrace, Central Spain. *Geology Magazine*. 123: 279-286.

Xinping H & Wei-Jun C. 2011. An assessment of ocean margin anaerobic processes on oceanic alkalinity budget. *Global biochemical cycles*. 25: GB3003.

Bibliografía adicional de interés

Antoine P, Limondin-Lozouet N, Chaussé C, Lautridou J-P, Pastre J-F, Auguste P, Bahain J-J, Falguères C & Ghaleb B. 2007. Pleistocene fluvial terraces from northern France (Seine, Yonne, Somme): synthesis and new results from interglacial deposits. *Quaternary Science Reviews*. 26(22-24): 2701-2723.

Brunhes J. 1902. L'irrigation: ses conditions géographiques, ses modes et son organisation dans la péninsule ibérique et dans l'Afrique du nord. Naud, París, 579 pp.

Carcavilla L, de la Hera Á, Fidalgo C & González-Martín J A. 2009. 7220 Formaciones tobáceas generadas por comunidades briofíticas en aguas carbonatadas. 62 pp. En: VV.AA. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid.

Carcavilla L, Durán J J, Vázquez Á & Vázquez-Navarro J. 2014. Patrimonio geomorfológico: conservación y gestión de los edificios y paisajes tobáceos. pp. 339-348. En: González-Martín J A & González-Amuchastegui M J (eds.) Las tobas en España. Sociedad Española de Geomorfología.

Cremaschi M, Zerboni A, Spötl C & Felletti F. 2010. The calcareous tufa in the Tadrat Acacus Mt. (SW Fezzan, Libya). An early Holocene palaeoclimate archive in the central Sahara. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 287: 81-94.

Domínguez-Villar D, Vázquez-Navarro J A & Carrasco R. 2012. Mid-Holocene erosive episodes in tufa deposits from Trabaque Canyon, central Spain, as a result of abrupt arid climate transitions. *Geomorphology*. 161-162: 15-25.

Fairchild I & Baker A. 2012. *Speleothem Science: From Process to Past Environments*. Blackwell Quaternary Geoscience Series, Chichester, 448 pp.

Ihlenfeld C, Norman M D, Gagan M K, Drysdale R N, Maas R & Webb J. 2003. Climatic significance of seasonal trace element and stable isotope variations in a modern freshwater tufa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 67: 2341-2357.

Lespez L, Clet-Pellerin M, Limondin-Lozouet N, Pastre J-F, Fontugne F & Marcigny C. 2008. Fluvial system evolution and environmental changes during the Holocene in the Mue valley (Western France). *Geomorphology*. 98(1-2): 55-70.



Lojen S, Trkov A, Šćancar J, Vázquez-Navarro J A & Cukrov N. 2009. Continuous 60-year stable isotopi and earth-alkali element records in a modern laminated tufa (Jaruga, river Krka, Croatia): implications for climate reconstruction. *Chemical Geology*. 258: 242–250.

Pedley H M. 2009. Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology*. 56: 221–246.

Santisteban J I & Schulte L. 2007. Fluvial networks of the Iberian Peninsula: a chronological framework. *Quaternary Science Reviews*. 26(22-24): 2738-2757.

Valero B L, Moreno A, Navas A, Mata P, Machín J, Delgado A, González-Sampéris P, Schwalb A, Morellón M, Cheng H & Edwards R L. 2008. The Taravilla lake and tufa deposits (Central Iberian Range, Spain) as palaeohydrological and palaeoclimatic indicators. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 259: 136–156.

Vázquez-Navarro J A, Vázquez Á & Carcavilla L. 2014. Caracterización general y distribución espacial. pp. 103-118. En: González-Martín J A & González-Amuchastegui M J (eds.) *Las tobas en España*. Sociedad Española de Geomorfología.