

Cuevas kársticas y no kársticas: del subsuelo terráqueo a las cavidades extraterrestres

Karst and non-karst caves: from the Earth ground to extraterrestrial caves

EULOGIO PARDO-IGÚZQUIZA¹ Y PEDRO A. ROBLEDO-ARDILA²

¹Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas, 23, 28023 Madrid; E-mail: e.pardo@igme.es

²Unidad del IGME en las Islas Baleares. C/Ciudad de Queretaro s/n, 07007, Palma de Mallorca, Baleares. E-mail: pa.robledo@igme.es

Resumen En este trabajo nos hacemos eco de una interesante paradoja; las cuevas, que en el pasado dieron cobijo a los seres humanos en la prehistoria y que tanta importancia tienen en nuestro planeta por muy variados motivos, son también de gran importancia y actualidad en geología planetaria e investigación espacial como posible habitáculo para las futuras misiones tripuladas a Marte. Adicionalmente, las cuevas serán candidatas excepcionales para buscar indicios de vida actual o pasada, en dicho planeta. En este trabajo se repasan los tipos de cuevas naturales que podemos encontrar en la Tierra de acuerdo al mecanismo que las origina y la litología donde se desarrollan. Esto nos permite extrapolar, por analogía, qué tipo de cuevas es posible encontrar en otros cuerpos del sistema solar, esto es, qué tipo de cuevas extraterrestres cabe esperar descubrir en el futuro. Concluimos este trabajo examinando la situación actual del estado de nuestro conocimiento en tal sentido.

Palabras clave: Cuevas por disolución, cuevas tectónicas, Karst, Marte, tubos volcánicos.

Abstract *In this work we deal with an interesting paradox: caves, which were the habitat of man in prehistoric times and which are so important on Earth for many reasons, are also relevant in Planetary Geology and in space research, as they could provide shelter for future manned missions to Mars. Additionally, caves will be good candidates to search for life (present or past) on the Red Planet. In this work we review the types of caves that one can find on Earth according to their origin and lithology. This allows us to infer, by analogy, the kind of caves that one can expect to find on other celestial bodies of the Solar System, that is, extraterrestrial caves. We conclude this work with the current state of the art of our knowledge on extraterrestrial caves*

Key words: *Dissolution caves, karst, Mars, tectonic caves, volcanic tubes.*

INTRODUCCIÓN

Se entiende por cueva, o caverna, toda cavidad natural del subsuelo, accesible o no, y sin importar sus dimensiones, disposición, origen o litología afectada (Renault, 1987). El principal problema de esta definición es que incluye como cuevas la porosidad de una roca, la cual puede ser de tamaño milimétrico. Por ello, una definición más práctica sería considerar un tamaño mínimo de la cavidad para ser considerada como cueva, de modo que debería ser accesible a que pudiese entrar una persona. Sin embargo esta restricción también debe ser flexible, pues cuevas de menor tamaño se podrían explorar con pequeños robots, especialmente para las cuevas extraterrestres, en la Luna, otros planetas del Sistema Solar o sus satélites. A este tipo de cuevas de pequeño tamaño se le ha llamado proto-cuevas

(Field, 2002). Para cuevas kársticas se puede considerar la definición de Ford (1988) quien define como cueva kárstica, o sistema de cuevas kársticas, a conductos formados por disolución, de un tamaño mayor a 15 mm de diámetro o sección (tamaño mínimo correspondiente a la apertura efectiva para el flujo turbulento), que se extienden, de forma continua, desde unos puntos de entrada de agua subterránea a unos puntos de salida. En cualquier caso, la acepción que aquí se adopta es más general y una cueva puede consistir desde una simple cavidad en el subsuelo, a un simple conducto alargado, o formar toda una red de conductos de decenas de kilómetros, con pozos, meandros, gateras, salas, galerías, lagos y sifones (Martínez-Hernández, 2012). En España, la entrada vertical a una cueva se la conoce como sima (*pothole*), pero dicha distinción no es internacional y el nombre genérico de cueva (*cave*) puede cubrir

todos los casos. Por otra parte, los abrigos en roca así como las viseras o resaltes de roca, sin ningún desarrollo en profundidad, no se suelen considerar como cuevas. En nuestro planeta, la mayoría de las cuevas se asocian con el karst, un tipo de geomorfología tanto en superficie como subterránea que se desarrolla principalmente en rocas carbonatadas (calizas, dolomías, mármoles o brechas carbonatadas). Estas rocas son solubles a un agua de lluvia que se vuelve ligeramente ácida al tomar dióxido de carbono de la atmósfera y del suelo. Por consiguiente, al infiltrarse y percolar hacia el interior del macizo kárstico va ensanchando por disolución las fracturas y fisuras por las que circula. La investigación científica de las cuevas se desarrolla ampliamente durante el siglo pasado de la mano del gran desarrollo de la espeleología y de la geomorfología. En la actualidad son muy numerosos los sistemas kársticos descubiertos por los espeleólogos y geomorfólogos, con miles de kilómetros de conductos kársticos explorados. El interés por las cuevas tiene numerosos motivos, además del espíritu deportivo y de aventura de los exploradores. Por una parte los terrenos kársticos albergan importantes acuíferos cuyos recursos hídricos proporcionan agua potable a un cuarto de la población mundial (Ford and Williams, 2007); por otra, las cuevas albergan una fauna troglodita única que contribuye a incrementar la biodiversidad (Cano y Martínez, 1999), asimismo hay floras endémicas asociadas a la entrada de muchas cuevas (Serrano-Germes, 1981), y en las profundidades del karst se pueden encontrar microorganismos que pudieran tener importancia futura (Barton *et al.*, 2004), en farmacología por ejemplo. Además, todas las cavernas, no sólo las kársticas, tienen un interés científico para el geólogo, el paleoclimatólogo, el geomorfólogo y el hidrogeólogo, que obtienen importante información científica en las mismas. No menos importante resultan las cuevas para la arqueología, la prehistoria y la paleontología humana, por los importantes descubrimientos que se han efectuado y se siguen efectuando en las mis-

mas (Stringer y Andrews, 2005). No hay que olvidar tampoco que en las cuevas se han encontrado las primeras manifestaciones humanas del arte (Leroi-Gourhan, 1984) y diversos ritos antropológicos (funerarios, religiosos, de iniciación, etc.).

Resulta paradójico que las cuevas, que dieron cobijo a las sociedades prehistóricas, estén de gran actualidad por su gran importancia en investigación espacial (Boston *et al.*, 2003). Por una parte a las cuevas extraterrestres se las contempla como posible refugio para futuras misiones tripuladas a Marte, y por otra parte tienen una gran importancia científica pues se las considera como lugares idóneos para buscar indicios de vida presente o pasada. En este trabajo, después de una breve compilación de los tipos de cuevas que se encuentran en la Tierra, se resumen las posibilidades y expectativas de encontrar cuevas en otros cuerpos del Sistema Solar. En particular en Marte porque es la próxima frontera de la exploración espacial tripulada, es un planeta con gran interés geológico y se está comenzando a estudiar de modo intensivo por las diversas sondas espaciales que lo orbitan y por vehículos (*rovers*) que se están desplazando sobre su superficie.

LAS CUEVAS EN LA TIERRA: CUEVAS KÁRSTICAS Y NO KÁRSTICAS

Existen varias clasificaciones de los tipos de cuevas atendiendo a diversos criterios. Por ejemplo, atendiendo a los principales procesos físicos o químicos que las originan (Tabla I) o por las rocas o medio físico en que se desarrollan (Tabla II). En cuanto a los procesos que originan cuevas, éstos son muy variados tal y como se muestra en la Tabla I. En primer lugar, aunque no son las más abundantes, como ha quedado dicho anteriormente, tenemos las cuevas originadas por procesos de tipo mecánico. En este caso distinguimos las cuevas originadas por los procesos tectónicos en relación a la geodinámica interna de la Tierra (cuevas tectónicas), y las cuevas origina-

ORIGEN DE LAS CUEVAS	NOMBRE EN INGLÉS	PRINCIPAL MECANISMO FÍSICO O QUÍMICO
Cuevas de origen mecánico	Tectonic caves	Tectónico. En relación a <i>rifting</i> , fallas, ...
	Mechanical weathering caves. Talus caves or boulder caves. Suffosional caves. Mud caves	Geotécnico. Meteorización mecánica. Grietas de deslizamientos. Cuevas de talud. <i>Piping</i> en suelos. Cuevas de barro.
Cuevas por disolución	Dissolution caves	Rocas solubles: Yesos Otras rocas evaporitas
		Rocas poco solubles: Calizas Dolomías Mármoles Brecha carbonática
		Rocas insolubles: Areniscas Cuarzitas Granitos
Cuevas en tubos de lava	Lava tube caves	Rocas volcánicas
Cuevas en glaciares	Ice caves	Fusión de hielo
Cuevas en permafrost	Permafrost caves	Fusión del hielo en el permafrost
Cuevas litorales	Litoral caves	Acción del oleaje

Tabla I. Clasificación de las cuevas por los procesos físicos y químicos que las originan.

TIPO DE ROCA	NOMBRE EN INGLÉS	EJEMPLO REPRESENTATIVO
Cuevas en rocas carbonáticas	Carbonate caves	Parque Nacional Mammoth Cave, (Kentucky , EEUU) (Palmer, 1979)
Cuevas en yesos	Gypsum caves	Karst de yesos de Sorbas (Almería, España) (Sanna et al., 2015)
Cuevas en otras rocas evaporíticas	Salt caves	Sedom cave (Israel) (Frumkin et al., 1991)
Cuevas en areniscas	Sandstone caves	Churi-Tepui System en Chimanta Massif y Ojos de Cristal System en Roraima Tepui (Venezuela) (Aubrecht et al., 2011)
Cuevas en cuarcitas	Quartzite caves	Corona 'e Sa Craba Cave (SW Sardinia, Italia) (Sauro et al., 2014)
Cuevas en granito	Granite caves	Cavidades en el área granítica de Castelo da Furna (Portugal) (Vaqueiro Rodríguez, 2003).
Cuevas en rocas volcánicas	Tube caves, volcanic caves	Parque Geológico Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife, España) (Socorro Hernández et al., 2010).
Cuevas en arcillas y margas	Piping caves	Cuevas Sesó en el Pirineo Central (Huesca, España) (Bartolomé et al., 2013)
Cuevas en bloques de rocas	Talus caves	Pinnacles' caves National Park (California, EEUU) (Alt, D. y Hyndman, D. W., 2000).
Cuevas en barro	Mud caves	Anza Borrego Desert State Park, San Diego County, (California, EEUU) (Lindsay y Lindsay, 2006)

Tabla II. Clasificación de las cuevas por la litología o medio natural en la que se desarrollan.

das por procesos mecánicos propios de la geodinámica externa (cuevas por meteorización mecánica, cuevas asociadas a la cicatriz de deslizamientos, cuevas de talud, cuevas por tubificación (*piping*) y cuevas de barro). Con respecto a las cuevas tectónicas, éstas se forman por la separación o movimiento de bloques del terreno en relación a fracturas y fallas en zonas de *rifting* (Davis, 1998) y también pueden originarse como consecuencia de terremotos. Estas cuevas suelen ser aperturas en relación a fracturas profundas y estrechas con paredes planas. Ejemplos espectaculares de este tipo de cuevas, de tamaño gigante, se observan en otros planetas como se verá más adelante. En cuanto a los procesos mecánicos de la geodinámica externa que originan cuevas, un primer tipo son las cuevas por meteorización mecánica (*mechanical weathering caves*) por la acción conjunta del viento, los ciclos de hielo-deshielo o los cambios de temperatura que originan cuevas en diferentes tipos de rocas competentes, de areniscas a granitos (Gaál, 2004). Otro tipo de cuevas son las grietas que originan simas cerca de zonas donde hay un cambio brusco de pendiente y donde se está gestando un futuro deslizamiento (Harp y Crone 2005, Fig. 6). Un tercer grupo de cuevas mecánicas son las cuevas de talud (*talus caves*) que se forman por los huecos que quedan entre bloques de gran tamaño en la base de un deslizamiento o caída de rocas (White y Culver, 2012). Por otra parte, en la cabecera de barrancos en zonas de suelos o materiales detríticos de tamaño fino (arcillas y margas), se puede producir una socavación basal por la retirada de materiales arrastrados por el drenaje de agua que produce el fenómeno de *piping* en suelos, con colapsos y la formación de simas (Gutiérrez-Elorza, 2008). Más raras son las cuevas de barro (*mud caves*) donde aguas de avenidas han socavado canales que son posteriormente cubiertos por deslizamientos de barro y a continuación sucesivas avenidas lavan y arrastran los niveles más bajos, originando las cavidades. Desde un punto de vista cuantitativo las cavidades de origen kárstico, genera-

das por la disolución parcial de rocas carbonáticas (y evaporíticas en menor medida), pueden ser consideradas como los principales ambientes subterráneos naturales. Esto es así especialmente porque hay un tipo de rocas, las rocas carbonáticas, que son relativamente solubles y bastante abundantes sobre la superficie terrestre. De hecho, entre un 13% y un 19% de la superficie de la Tierra está ocupada por afloramientos carbonáticos (y evaporíticos) susceptibles de ser karstificados (Durr et al., 2005; Ford and Williams, 2007) y, por consiguiente, susceptibles de albergar cuevas. Estas cuevas se desarrollan en los llamados terrenos kársticos, como ya se ha comentado con anterioridad en este trabajo. El karst fue definido originalmente en la región del kras en Eslovenia y se conoce como karst dinárico. Este es el karst clásico, que puede encontrarse en todas las partes del mundo y en particular los karst carbonatados que encontramos en España (Pulido-Bosch, 1996). Las cuevas se originan por disolución parcial de la roca, principalmente a lo largo de discontinuidades de las rocas que forman el macizo carbonatado. Estas discontinuidades pueden ser fisuras, diaclasas, fracturas, planos de estratificación que se van ensanchando por la disolución en primer lugar, con la contribución de la acción mecánica de abrasión del agua y el desplome gravitacional de techos y paredes de cuevas. Más del 80% de las todas las cuevas censadas del mundo tienen este origen espeleogenético. Estas cuevas pueden constituir una red de conductos dentro del sistema kárstico que puede llegar a tener cientos de kilómetros explorables (Ford y Williams, 2007). La intersección de esta red con la superficie del terreno da lugar a simas (Fig. 1). También, parte de la red de conductos kársticos pueden ser freáticos, por lo que están completamente llenos de agua y son sólo accesibles por espeleobuceo (Stevanović, 2015). Es el caso más extremo en la exploración de cuevas kársticas y el punto donde se detienen muchas exploraciones, por lo menos temporalmente. Obviamente, las rocas más solubles como el yeso y otras rocas evaporitas (por



Fig. 1. Macizo kárstico de la sierra de las Nieves en la provincia de Málaga. La flecha amarilla señala una sima que conecta con un pozo vertical de entrada al sistema y que se continúa con varios kilómetros de galerías y conductos kársticos. Foto: proyecto de investigación KARSTINIV.

ejemplo la halita y otras sales) también desarrollan cuevas, aunque son más frecuentes en zonas áridas. En el caso del yeso se tiene el llamado karst en yesos (Calaforra, 1988), por el buen desarrollo que pueden alcanzar la red de conductos, en modo semejante al karst en carbonatos. Pero incluso las rocas que se pueden considerar como casi insolubles (areniscas, cuarcitas o basaltos entre otras) pueden desarrollar cuevas si las circunstancias son propicias, esto es, tiempo suficiente a escala geológica y disponibilidad de un agente disolvente en abundancia (agua ligeramente ácida en climas húmedos).

Otro tipo de cuevas, de muy diferente origen, son las cuevas en tubos de lava que son frecuentes en los terrenos volcánicos como ocurre en las islas Canarias (Rodríguez-Fernández, 2010). Se forman cuando en un río de lava se solidifica la parte superior, formando una corteza sólida, con el posterior drenaje de la lava que circula por el interior y que deja un vacío que constituye la cueva en forma de tubo. En cuanto a las cuevas en glaciares, se forman por el agua de fusión que abre túneles de drenaje a través del hielo. El término más general de cuevas de hielo incluye a cualquier otro tipo de cueva que atrapa aire con temperatura por debajo del punto de congelación y donde se congela el agua que penetra y se mantiene helada dentro de la cueva. También hay simas en las fracturas que se forman en las plataformas de hielo. Las cuevas en permafrost se producen por fusión de hielo del subsuelo, y con un posible colapso del material de la cobertera. El paisaje así formado se denomina termokarst o criokarst. Las cuevas litorales se forman en cualquier litología por acción principalmente del oleaje que socaba la roca para formar la cueva. Por otra parte, las cuevas se pueden desarrollar en prácticamente todo tipo de roca, tal y como se muestra en la tabla II, donde también se proporcionan ejemplos representativos de cada tipo.

CUEVAS EXTRATERRESTRES

Cabe esperar la existencia de cuevas extraterrestres, ya que no hay razones científicas que justifiquen su ausencia en otros cuerpos celestes del

Sistema Solar. De hecho se han tomado fotografías de lo que se intuye son entradas de cuevas en Marte. Este hecho es muy interesante por diferentes razones que se analizan a continuación.

Importancia científica y aplicada de las cuevas extraterrestres

Hasta la fecha, como evidencia de cuevas extraterrestres, se han identificado surcos en la Luna que se suponen tubos de lava colapsados (Oberbeck *et al.*, 1969), así como diferentes tipos de cuevas en Marte (Cushing, 2012). Esto no significa que no haya cuevas en otros planetas o sus satélites, sino simplemente que aún no se ha llegado a efectuar tal verificación. De hecho, la detección de cuevas en el subsuelo no ha sido todavía un objetivo específico en las misiones de investigación espacial. No obstante, esto está cambiando ya que, por ejemplo para la exploración de Marte, las cuevas se consideran de gran importancia desde un punto de vista científico y práctico. Desde un punto de vista científico para la búsqueda de posible vida presente o pretérita, y desde un punto de vista práctico como una opción atractiva para construir refugios que puedan ser utilizados en futuras misiones tripuladas a Marte. En efecto, las cuevas servirán para protegerse de la intensa radiación solar, impactos de micro-meteoritos, tormentas de polvo, y pueden proporcionar condiciones más confortables que las prevalentes en la superficie, además de un mejor acceso a determinados recursos como el agua y materias primas. Por ejemplo, se conoce que el régimen de temperaturas en las cuevas terrestres es mucho más estable que el de la superficie debido al efecto de aislante térmico del material de la corteza que está por encima de la cueva. Un efecto similar es esperable en las cuevas de Marte, donde las temperaturas exteriores actuales son muy bajas aun con los consiguientes variaciones diarias y estacionales.

Tipos de cuevas extraterrestres

El proceso más general para la formación de una cueva en un cuerpo celeste, sin considerar su litología, es el agrietamiento (fracturación) del material de su corteza. El origen de este agrietamiento es diverso: la presión del magma del interior del planeta en relación con volcanismo, el levantamiento tectónico, los esfuerzos tectónicos direccionales, de compresión y extensionales de *rifting*, las fallas geológicas, los terremotos y los cráteres de impacto de cuerpos del espacio exterior. Sin embargo, hay que señalar que aunque en Marte hay muchas evidencias de actividad tectónica pretérita, todo indica que no opera la Tectónica de Placas, lo que es una diferencia muy importante con respecto a la Tierra. La figura 2 muestra un ejemplo sobre la superficie de Marte donde la fractura puede ser debida al propio peso del mega-volcán que aparece en la figura (Borgia *et al.*, 2000). Otro tipo de mecanismo muy importante en la formación de cuevas extraterrestres involucra a los tubos volcánicos. En este caso, al igual que en la Tierra, la parte superior del río de lava se solidifica, mientras que en la parte interior se drena la roca fundida formándose la cavidad. No hay duda alguna de que ha existido una actividad volcánica muy importante en la Luna y en Marte, como lo

TIPO DE CUEVAS	NOMBRE EN INGLÉS	OTRA INFORMACIÓN RELEVANTE
Cuevas de origen mecánico	Tectonic caves	En relación a <i>rifting</i> , fallas, ...
	Geotechnical caves	Meteorización mecánica Grietas de deslizamientos Cuevas de talud <i>Piping</i> en suelos
Cuevas por disolución	Disolution caves	Rocas carbonáticas
Cuevas en tubos de lava	Lava tube caves	Colapsos en tubos de lava
Cuevas en permafrost	Permafrost caves	En Marte hay agua y CO ₂ helado en el suelo.

Tabla III. Tipos de cuevas que cabe esperar en Marte.

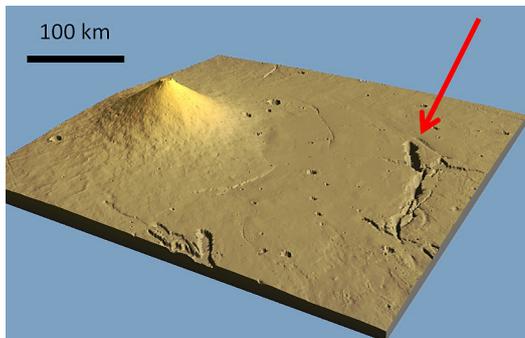


Fig. 2. Cueva tectónica en Marte. Esta gran fisura está posiblemente relacionada con deformaciones del terreno en relación al propio peso del edificio volcánico (Elysium Mons) que aparece a la izquierda. Figura de elaboración propia del autor utilizando los datos del modelo digital de elevaciones del Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA).

atestiguan los campos basálticos lunares o los mega-volcanes de Marte. Los tubos volcánicos se han apreciado claramente en la Luna y se creen identificados con una probabilidad muy alta en Marte. Por consiguiente, se espera que este tipo de cuevas sea muy abundante en otros cuerpos celestes del Sistema Solar donde haya existido actividad volcánica. Las cuevas en el permafrost (Ford, 1970), causadas por fusión y sublimación del hielo (en Marte agua y CO₂) en el subsuelo, podrían encontrarse en Marte. Se han detectado asimismo cráteres que pueden estar relacionados con procesos similares al *piping* en la Tierra. Las cuevas en hielo se intuye que puedan encontrarse en cuerpos celestes como el satélite de Saturno Encéfalo y el satélite de Júpiter Europa, cuyas superficies permanecen heladas. Sin embargo, son las cuevas por disolución el gran misterio y la gran esperanza en la exploración de Marte. Se conoce que en la historia geológica de Marte, el espesor y densidad de la atmósfera era mayor que en la actualidad y con un gran contenido en CO₂ que pudo capturarse en una época más húmeda en forma de rocas carbonatadas, y que ahora se encontrarían en el subsuelo profundo marciano. Hasta la fecha se han detectado lo que se cree son formas kársticas de disolución en un domo evaporítico (Baioni y Tramontana, 2015) donde se propone la existencia de lapiaz y dolinas, y una supuesta zona de cavernas que fueron el sumidero de las mega-avenidas de los canales de Hebrus Valles (Rodríguez *et al.*, 2012). No obstante estos últimos autores proponen que un proceso importante en la formación de las cavernas fue la evacuación de material del subsuelo por volcanes de barro (*mud volcanism*).

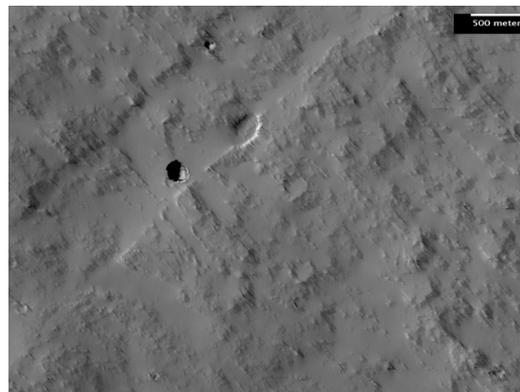


Fig. 3. Colapso en una zona volcánica (el flanco este del volcán Pavonis Mons) donde se ha producido una subsidencia debido a una zona con fracturas de extensión similares a las fracturas de la figura 2 pero de mucha menor magnitud. Foto MRO/HiRISE (NASA/JPL/University of Arizona).

Detección de cuevas extraterrestres

Además de la detección visual de cuevas a partir de imágenes que proporcionan las sondas espaciales como las que se pueden ver en las figuras 3 a 6, la localización de cuevas por un método físico es de sumo interés por razones evidentes. En este sentido, el método preferible es la detección térmica de cuevas. Dicha detección se basa en el uso de imágenes del infrarrojo térmico que capturen el contraste de temperatura entre la cueva y el terreno circundante (Wynne *et al.*, 2008). En la Tierra, y se supone que también en Marte, las cuevas presentan estabilidad termo-higrométrica en contraposición con el exterior que sufre mayores variaciones. Es por ello que la temperatura en la cueva es más cálida cuando en el exterior las temperaturas son bajas o la temperatura en la cueva es más baja cuando en el exterior es más elevada. Estas diferencias se aprecian en las variaciones de temperatura diaria y se acentúan estacionalmente. En el trabajo experimental de Wynne *et al.* (2008) se estableció la viabilidad de la detección de cuevas utilizando el infrarrojo térmico, se mejoró nuestra comprensión del comportamiento térmico

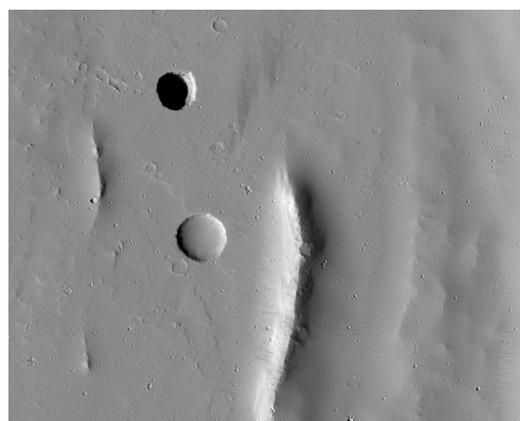
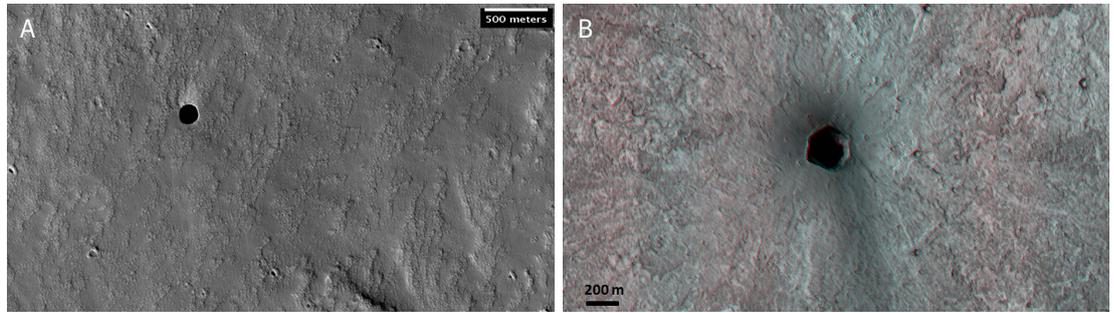


Fig. 4. Sima de colapso en Tractus Fossae (Marte) que es una región con elevaciones y depresiones creadas por la actividad tectónica. Esta fosa está localizada en la zona volcano-tectónica de Tharsis. Foto MRO/HiRISE (NASA/JPL/University of Arizona).

Fig. 5. Apertura vertical en una zona volcánica de la superficie de Marte (un flanco del volcán Arsia Mons) y que pudiera ser una entrada a un tubo volcánico. B: Conducto volcánico (vent) en la superficie de Marte. Fotos MRO/HiRISE (NASA)/PL/University of Arizona).



de las cuevas, se identificaron los tiempos de máximo contraste térmico, se establecieron protocolos de monitorización de temperatura, se identificaron los principales problemas relacionados con la longitud de onda óptima, con el ángulo óptimo de visión y con la resolución espacial de las imágenes térmicas. Sin embargo, Wynne *et al.* (2008) utilizaron una cámara térmica infrarroja manual en el desierto de Atacama, por lo que es necesaria más investigación en un método aerotransportado para la detección térmica de cuevas. Particularmente, utilizando este fundamento y las imágenes proporcionadas por el *Mars Odyssey Thermal Emission Imaging System* (THEMIS) se han detectado pozos verticales que parecen ser entradas a cuevas en una región volcánica de Marte (Cushing *et al.*, 2007). El diámetro de estos pozos varía de 100 a 225 m y la profundidad se estimaba en torno a 100 m. Se desconoce si estos pozos enlazan con una red de conductos subterráneos, pero abre grandes expectativas para su investigación.

Para concluir, conviene destacar que en la actualidad existen multitud de recursos gratuitos en internet con un gran interés para Geología Planetaria, en general, y el tema de Geomorfología Planetaria y

detección de cuevas, en particular. Se puede destacar *Goggle™ Earth* como visor para la observación de las fotografías satélite de la superficie de la Luna y Marte, así como la página web de la NASA (www.nasa.gov) donde se puede acceder a multitud de imágenes, como las figuras 3 a 6 de este trabajo, que han sido obtenidas por diferentes sondas espaciales a lo largo de los últimos años.

CONCLUSIONES

Las cuevas en la Tierra son muy frecuentes y tienen diversos orígenes tanto físicos como químicos. Por la universalidad de las leyes físicas, no existen razones que inhiban la formación de cuevas en otros cuerpos del Sistema Solar, con las consiguientes correcciones por diferencias gravitacionales, de tipos de roca, de atmósfera, de régimen climático y de flujos de energía interna en función de la actividad tectónica del planeta. Sin lugar a dudas, y por razones muy diversas, las mayores expectativas para el estudio de cuevas extraterrestres están puestas en Marte. Por una parte, Marte es un planeta muy interesante desde el punto de vista geológico y cuya historia geológica puede desvelar grandes sorpresas. Por otra parte, existen indicios de que hayan podido existir épocas geológicas en las que el agua ocupara grandes extensiones en superficie, y donde pudo florecer algún tipo de vida primitiva. Actualmente, se han detectado posibles entradas a cuevas en Marte y se piensa en ellas como sitios ideales para intentar buscar indicios de vida presente o pretérita. Asimismo, se contempla a las cuevas como posibles refugios para futuras misiones tripuladas al Planeta Rojo. En este trabajo se hace una revisión de dichas expectativas a la vista de los indicios de cuevas ya detectados y por la analogía de los tipos de cuevas que podemos encontrar en la Tierra. Sin lugar a dudas, lo mejor sobre la investigación de cuevas extraterrestres está todavía por llegar.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos expresar nuestro agradecimiento a los dos revisores anónimos cuyos comentarios han contribuido a mejorar la versión final de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Alt, D. y Hyndman, D. W. (2000). *Roadside Geology of Northern and Central California*. Mountain Press Publishing Company, 369 p.

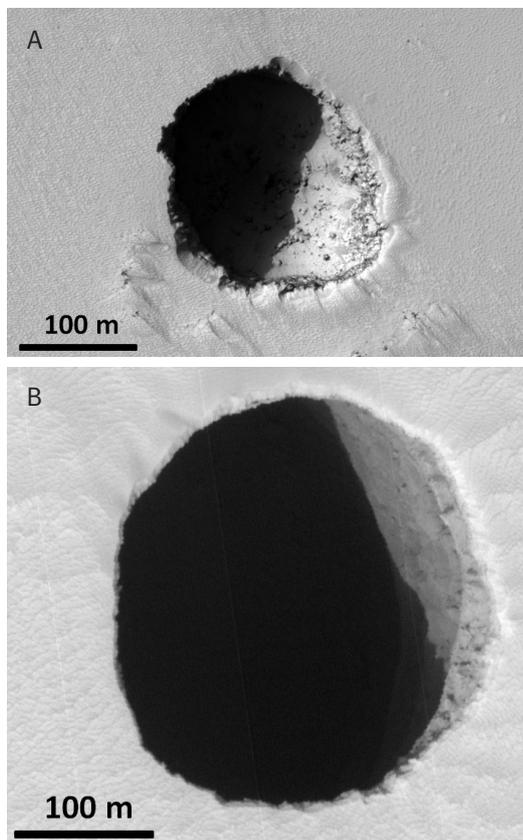


Fig. 6. Detalles de lo que se supone que son entradas verticales a cuevas en la superficie de Marte. A: Lo que parece ser producto del colapso. Este es un detalle de la figura 3. B: Entrada más vertical que no deja ver el fondo de la oquedad. Este es un detalle de la figura 4. Fotos MRO/HiRISE (NASA)/PL/University of Arizona).

- Aubrecht, R., Lánczos, T., Gregor, M., Schlögl, J., Šmída, B., Liščák, P., Brewer-Carías, Ch. y Vlček, L. (2011). Sandstone caves on Venezuelan tepuis: Return to pseudokarst? *Geomorphology*, 132, 351–365.
- Baioni, D. y Tramontana, M. (2015). Evaporite karst in three interior layered deposits in Iani Chaos, Mars. *Geomorphology*, 245, 15–22.
- Baioni, D., Zupan Hajna, N. y Wezel, F.C. (2009). Karst landforms in a Martian evaporitic dome. *Acta Carsologica*, 38.1, 9–18.
- Bartolomé, M., Sancho, C., Moreno, A., Belmonte, A., Bastida, J., Calle, M., Mas, J. y Fuertes, X. (2013). El papel del *piping* en la espeleogénesis del sistema endokárstico de Sesó (Pirineo central, Huesca). *Geogaceta*, 53, 105–109.
- Barton, H. A., Taylor, M. R. y Pace, N. R. (2004). Molecular phylogenetic analysis of a bacterial community from an oligotrophic cave environment. *Geomicrobiology Journal*, 21, 11–20.
- Boston P.J., Frederick, R.D., Welch, S.M., Werker, J., Meyer, T.R., Sprungman, B., Hildreth-Werker, V., Thompson, S.L. y Murphy, D.L. (2003). Human utilization of sub-surface extraterrestrial environments. *Gravitational and Space Biology Bulletin*, 16, 121–131.
- Borgia, A., Delaney, P. T. y Denlinger, R. P. (2000). Spreading volcanoes. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 28, 539–70.
- Calaforra, J. M. (1998). *Karstología de yesos*. Universidad de Almería – Instituto de Estudios Almerienses eds., Serie Monografías Ciencia y Tecnología, 3, 384 p.
- Cano Santana Z. y Martínez Sánchez, J. (1999). *Las cuevas y sus habitantes*. Fondo de Cultura Económica, México, 168 p.
- Cushing, G. E. (2012). Candidate cave entrances on Mars. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74, 33–47.
- Cushing, G.E., Titus, T.N., Wynne, J.J. y Christensen, P.R. (2007). THEMIS observes possible cave skylights on Mars. *Geophysical Research Letters*, 34, L17201, 5 p.
- Davis, R. A. (1998). Tectonic caves of Solai in the Kenyan Rift Valley. *International Journal of Speleology*, 27, 69–74.
- Durr, H. H., Meybeck, M. y Durr, S. H. (2005). Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. *Global Biogeochemical Cycle* 19, GB4510. doi: 10.1029/2005GB002515.
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Ed. Prentice-Hall, 920 p.
- Harp E. L., y Crone, A. J. (2005). *Landslides Triggered by the October 8, 2005, Pakistan Earthquake and Associated Landslide-Dammed Reservoirs*. Unites States Geological Survey, Open-File Report 2006–1052, 10 p.
- Field, M.S., (2002). *A lexicon of cave and karst terminology with special reference to Environmental karst hydrology*. National Center for Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, 214 p.
- Ford, D. (1988). *Characteristics of dissolution cave systems in carbonate rocks*. En: James, N.P. & Choquette, P.W. eds., *Paleokarst*, New York, Springer Verlag, 601p.
- Ford, D. y Williams, P. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, Chicester, 562 pp.
- Frumkin, A., Magaritz, M., Carmi, I. y Zak, I. (1991). The Holocene climatic record of the salt caves of Mount Sedom, Israel. *The Holocene*, 1, 191–200.
- Gaál, L., (2004). *Contribution to the cave origin by mechanical weathering in temperate zone*. Proceedings of the 14th International Congress of Speleology, Bulletin of Helene Speleological Society, Atenas, 2, 475–477.
- Gunn, J. (Editor) (2004). *Encyclopedia of caves and karst science*. Taylor and Francis, New York, 1724 p.
- Leroi-Gourhan, A. (1984). *Arte y grafismo en la Europa prehistórica*. Colegio Universitario de Ediciones Istmo, Madrid, 326 p.
- Lindsay L. y Lindsay, D. (2006). *The Anza-Borrego Desert Region: A Guide to the State Park and Adjacent Areas of the Western Colorado Desert*. Fifth Edition Wilderness Press, Berkeley, 304 p.
- Martínez Hernández, J. (2012). *Manual de espeleología*. Desnivel. Imprimex, Madrid, 304 p.
- Oberbeck, V. R., Quaide, W. L. y Greeley, R. (1969). On the origin of Lunar sinuous rilles. *Modern Geology*, 1, 75–80.
- Palmer, A. N. (1979). *Geological Guide to Mammoth Cave National Park*, Cave Books, 196 p.
- Pulido-Bosch, A. (1996). Los acuíferos kársticos españoles. *Investigación y Ciencia*, 232, 50–56.
- Renault, P. (1987). *La formación de las cavernas*. Ed. Orbis, 2^a Edición, Barcelona, 125 p.
- Rodríguez Fernández, R. (2010). *Parque Nacional de Timanfaya*. Guía Geológica, Instituto Geológico y Minero de España, Editorial Everest, Madrid, 204 p.
- Rodríguez, J.A.P., Bourke, M., Tanaka, K.L., Miyamoto, H., Karge, Baker, V., Fairén, A.G., Davies, R.J., Bridget, Linares Santiago, R., Zarroca Hernández, M. y Berman, D.C. (2012). Infiltration of Martian outflow channel floodwaters into lowland cavernous systems. *Geophysical Research Letters*, 39, L22201, 6 p.
- Sanna, L., De Waele, J., Calaforra, J.M. y Forti, P. (2015). Long-term erosion rate measurements in gypsum caves of Sorbas (SE Spain) by the Micro-Erosion Meter method. *Geomorphology*, 228, 213–225.
- Sauro, F., De Waele, J., Onac, B. P., Galli, E., Dublyansky, Y., Baldoni, E. y Sanna, L. (2014). Hypogenic speleogenesis in quartzite: The case of Corona ‘e Sa Craba Cave (SW Sardinia, Italy). *Geomorphology*, 211, 77–88.
- Serrano Germes, A. (1981). Caracterización ecológica de *Phyllitis scopendrium* (L.) Newman orientado a su conservación en la Comunidad Valenciana. *Lapiaz*, Monográfico 5.6, 184 p.
- Socorro Hernández, J.S., Láinez Concepción, A. y Mesa Luis, F. (2010). Parque geológico Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife). Una ruta interpretativa turística. En J. J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 270–292.
- Stevanović, Z. (Editor) (2015). *Karst aquifers – Characterization and Engineering*, Springer, New York, 698 p.
- Stringer, C. y Andrews, P. (2005). *La evolución humana*. Akal Ediciones, Madrid, 240 p.
- Vaqueiro Rodríguez, M. (2003). Caracterización de cavidades de bloques graníticos y cuevas estructurales de Vigo-Tui, (Galicia, España). Análisis morfo-estructural del sistema de O Folón. *Cuadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 28, 231–262.
- White, W.B. y Culver, D.C. (Editors) (2012). *Encyclopedia of caves*. Second Edition. Academic Press, Waltham, MA, 945 p.
- Wynne, J.J., Titus, T.N. y Diaz, G.C. (2008). On developing thermal cave detection techniques for earth, the moon and mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 240–250. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 2 de octubre de 2015 y aceptado definitivamente para su publicación el 9 de enero de 2016