

GEOMORFOLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL SISTEMA RORAIMA SUR, VENEZUELA, LA MAYOR CAVIDAD DEL MUNDO EN CUARCITAS: 10,8 km

Carlos GALÁN^{1,2}, Francisco F. HERRERA^{1,3} & Rafael CARREÑO¹

¹Sociedad Venezolana de Espeleología, Apartado 47.334, Caracas 1041-A, Venezuela;

²Sociedad de Ciencias Aranzadi, Alto de Zorroaga, 20014 San Sebastián, España. Correo-e: cegalham@yahoo.es

³Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Apartado 21827, Caracas 1020-A, Venezuela.

Recibido en abril de 2005

RESUMEN

El Sistema Roraima Sur, situado en la cumbre del tepuy Roraima (Guayana Venezolana), posee 10,8 km de desarrollo de galerías y constituye actualmente la mayor caverna del mundo en cuarcitas. La caverna se ha formado en cuarcita y otras rocas silíceas pertenecientes al Grupo Roraima, de edad Precámbrico (Proterozoico). El desarrollo de la cavidad es el producto de características topográficas, litológicas, hidrológicas y estructurales particulares que, unidas todas ellas, facilitan el establecimiento de un sistema de drenaje subterráneo de gran magnitud. Esto permite explicar parcialmente por qué en los tepuys existen grandes extensiones primariamente impermeables junto a otras karstificadas, aunque en ambos casos parece estar involucrado el mismo tipo de rocas. Este aspecto constituye una notable diferencia con el karst clásico en calizas. En el Sistema Roraima Sur, las aguas subterráneas han disuelto la roca aprovechando zonas de debilidad litológica, constituidas por niveles delgados de limolitas y lutitas, interestratificados en las cuarcitas, no obstante, se describen otros elementos geohidromorfológicos que han determinado el desarrollo de esta cavidad.

Palabras clave: Karst en cuarcitas, geomorfología, hidrología, Guayana venezolana.

ABSTRACT

Geomorphology and hidrology of Roraima Sur system, Venezuela: the longest cave of the world in quartzite.

The Roraima Sur Cave System, located in the summit of tepuy Roraima (Venezuelan Guayana), has 11 km of passage development. This cave is the world longest developed in quartzite. The cave opens in quartzite and related siliceous rocks of the Roraima Group of Precambrian (Proterozoic) age. The cave formation is the consequence of particular topographic, lithologic, hydrologic and structural features, that combined, have promoted the development of an extensive underground system. This unusual situation partially explains the coexistence on tablemountains of impermeable areas together with karstified sectors, despite the apparent presence of the same kind of rocks. This aspect is notoriously different from classical limestone karsts. The groundwater has dissolved the quartzite bedrock utilizing zones of lithological weakness, constituted

by thin beds of limolite and shale interstratified in the quartzite series, however, other geohydromorphological features are involved and described in the present note.

Key words: Quartzite karst, geomorphology, hydrology, Venezuelan Guayana.

INTRODUCCIÓN

En el Sur de Venezuela aflora parte del Escudo de Guayana, constituido por rocas ígneo-metamórficas con edades tan antiguas como 3,4 Ga (1 Ga = mil millones de años) y cubiertas discordantemente por arenitas cuarcíferas del Grupo Roraima, con edades de 1,8 a 1,5 Ga (Precámbrico, Proterozoico). Estas rocas sedimentarias han estado sometidas a un metamorfismo de bajo grado (URBANI *et al.* 1977).

La morfología típica de los afloramientos del Grupo Roraima son extensas mesetas de cumbre plana, contorneadas por escarpes o paredes verticales de hasta más de 1.000 m de desnivel, donde se encuentran las mayores cascadas del mundo (e.g. Salto Ángel, 978 m). La litología predominante del Grupo Roraima son cuarzo arenitas (denominadas también cuarcita debido a presentar metamorfismo de bajo grado) en las cuales los granos individuales de cuarzo son unidos por un cemento también silíceo, fundamentalmente sílice autigénico, lo cual constituye una diferencia con zonas europeas donde existen cuevas en areniscas, pero éstas son calcáreas o están relacionadas con rocas carbonáticas (URBANI 1986). Minoritariamente las cuarcitas del Grupo Roraima también incluyen rocas silíceas relacionadas, como arenitas líticas, feldespáticas, subarcosas, wacas cuarzosas, lutitas y limolitas interestratificadas (REID 1972; SIMÓN *et al.* 1985).

Estas rocas tradicionalmente eran consideradas insolubles y, por lo tanto, no aptas para la formación de cuevas. Pero en las últimas décadas se han ido descubriendo y explorando gran número de simas y cuevas (COLVÉE 1973, GALÁN 1982, 1983, 1986, 1995, GALÁN & LAGARDE 1988, SVE 1976, 1977, 1986, SZCZEBAN *et al.* 1977, URBANI 1981, 1986, URBANI & GALÁN 1987, URBANI *et al.* 1976). Cavidades en rocas similares han sido descritas también de Sudáfrica (MARTINI 1981, 1982) y Brasil (AULER & RUBBIOLI 2003, CARREÑO *et al.* 2002, DUTRA 1997, RUBBIOLI 2003).

La mayoría de las cavidades hasta ahora conocidas en cuarcitas son simas, muchas de ellas de considerable desnivel (hasta -481 m: Gruta do Centenario, Brasil) y algunas formando simas gigantes, de considerable volumen interno, como las simas de Sarisariñama (-314 m) (en el tepuy del mismo nombre), Aonda (-383 m) y Auyán-tepuy Norte (-320 m) (en el Auyán-tepuy). Las

exploraciones, reconocimientos y el análisis de fotografías aéreas han mostrado la posibilidad de existencia de cavidades en la mayor parte de las mesetas del Grupo Roraima, pero en general las cavidades conocidas poseen una extensión lateral pequeña. Excepciones a esto, lo son las simas Aonda y Aonda 2, así como las simas Menor y de la Lluvia de Sarisariñama, todas de más de 1 km de desarrollo de galerías internas, mostrando todas las características típico de karst. El mayor desarrollo hasta 2004 lo poseía la sima do Centenario (Minas Gerais, Brasil), una intrincada red de fisuras verticales y galerías estrechas de 4,7 km de desarrollo espacial (AULER & RUBBIOLI 2003).

Expediciones efectuadas entre 2002 y 2005 por la Sociedad Venezolana de Espeleología (SVE) prosiguieron el estudio de varias cavidades localizadas en años previos por la SVE en la cumbre del tepuy Roraima. Ello condujo a la exploración del presente sistema interconectado de simas y cuevas, de gran extensión lateral. El desarrollo de galerías topografiado alcanza hoy 10.820 m de desarrollo y -72 m de desnivel, habiéndose explorado 400 m adicionales de pequeñas prolongaciones. La caverna, con algo más de 11 km (se trata de una única cavidad, interconectada, con 18 bocas) constituye la mayor cavidad del mundo en cuarcitas.

El sistema posee bocas de moderadas o pequeñas dimensiones, sólo reconocibles mediante la prospección directa. Las bocas quedan además enmascaradas en un abrupto relieve, con gran número de grietas, pequeños cañones y rellenos de bloques. De hecho, 12 de las 18 bocas fueron halladas a partir de la exploración de las galerías internas. La cueva tiene varios cauces de agua subterránea que convergen en un colector, el cual se sume bajo bloques en una amplia galería. Se presume que las aguas subterráneas del sistema emergen a través de surgencias localizadas en la base de la pared exterior del tepuy, a 600-700 m por debajo del nivel de la cumbre; por lo cual, hidrogeológicamente, se trata también de un sistema de gran desnivel.

En algunas de las exploraciones de 2004-2005, la SVE contó con la colaboración de varios integrantes de la Sociedad de Ciencias Aranzadi (SCA, España) y Oxford University Caving Club (OUCC, Inglaterra).

Durante los trabajos de exploración y topografía efectuados durante estas expediciones, los autores tomaron un conjunto de datos geomorfológicos e hidrológicos, cuyos resultados presentamos en esta nota.

CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

La zona de estudio, en la cual se localiza el Sistema Roraima Sur, está situada en la parte central sur de la cumbre de Roraima, relativamente próxima a la gran pared o escarpe sur de la meseta. Las coordenadas, topografía y descripción física de la cavidad son dadas en la sección Catastro Espeleológico de Venezuela, de este mismo Boletín.

El tepuy Roraima alcanza una elevación máxima de 2.810 m s.n.m. y en su centro se localiza la frontera triple Venezuela - Brasil - Guyana. La aproximación para acceder a la cumbre es larga (2



Pared Oeste del Roraima, donde destaca la rampa de acceso al tepuy (Foto: R. Carreño).

días de marcha) y salva 40 km de distancia y 2.000 m de desnivel. La cumbre, de unos 15 por 10 km de extensión, posee una topografía relativamente plana, a 2.700 - 2.800 m de altitud, pero es muy intrincada en sus detalles. Junto a zonas de relieve suave, se presentan otras profundamente disectadas por fisuras y grietas, que siguen el patrón estructural de fracturamiento, y pequeñas mesetas o buttes que llegan a elevarse 50 m sobre las zonas planas circundantes. La parte sur de la meseta, enteramente en territorio venezolano, drena hacia la cuenca del río Caroní, afluente del Orinoco. Precisamente sobre el borde sur se localizan las mayores elevaciones de la cumbre. Este borde presenta un tramo central muy compacto, sector donde se localiza la cavidad, mientras que a E y O el borde está intensamente fracturado por grietas y cañones, que profundizan verticalmente cientos de metros, como puede apreciarse en las paredes externas.

El Grupo Roraima fue subdividido estratigráficamente en cuatro formaciones (REID 1972) y la mayor parte de sus afloramientos se concentra en la cuenca Caroní - Paragua, siendo la región del monte Roraima su localidad tipo. Las altas mesetas de cuarcita del Grupo Roraima se desarrollan en la Formación Matauí, de unos 1.000 m de espesor, la cual ocupa el techo de la serie. Las rocas que componen esta formación son cuarzo arenitas (cuarcitas), wacas cuarzosas, sublitarenitas y subarcosas (BRICEÑO & SCHUBERT 1992), con abundante estratificación cruzada, depositadas en ambientes continentales costeros, fluviales y deltaicos. La fuente de estos sedimentos se encontraba hacia el NE y SE del Escudo de Guayana, probablemente en Africa Occidental (antes de la apertura del Atlántico). Debido a la erosión del Escudo de Gondwana Norte, de poca inclinación, la erosión ha removido preferencialmente las rocas de los anticlinales, que hoy forman las zonas bajas alrededor de las mesetas. Los tepuys constituyen remanentes de grandes sinclinales erosionados, puestos en relieve por inversión topográfica (Fig. 1) (SCHUBERT 1984, SCHUBERT &

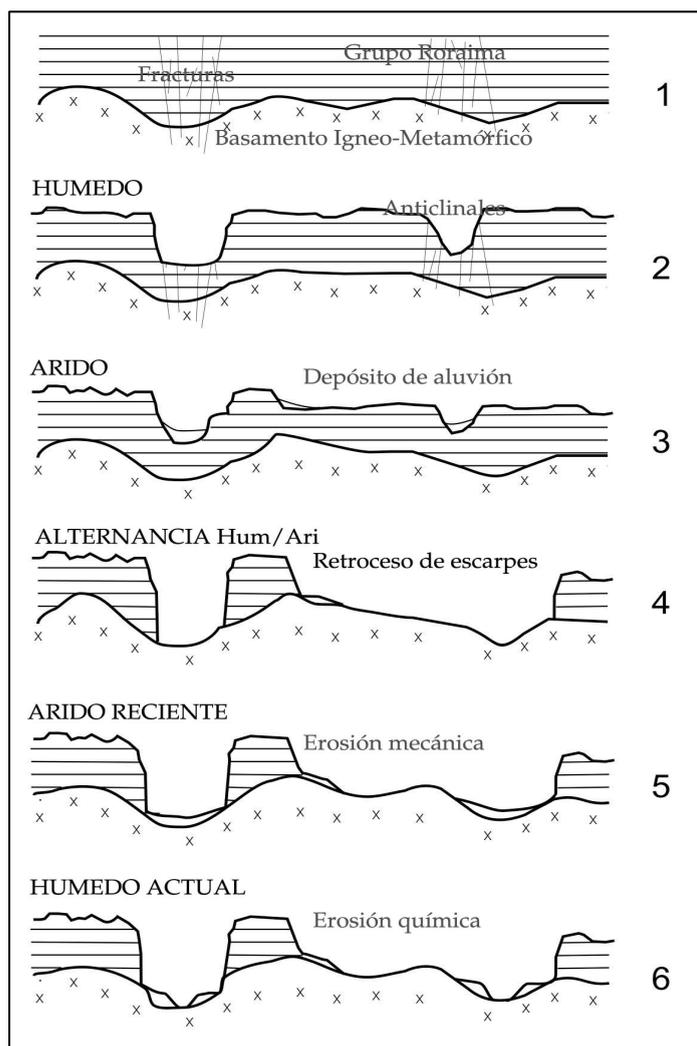


Fig. 1. Hipótesis de la evolución geomorfológica del paisaje tepuyano. 1. Deposición sobre un basamento igneo-metamórfico de sedimentos continentales deltaicos agrupados dentro del Grupo Roraima, de edad Precámbrica (Proterozoico). Los estadios 2-4 representan la remoción de extensos anticlinales desmantelados por la erosión en períodos alternantes de aridez y humedad, donde además se dieron procesos de deposición de aluviones. Más recientemente (5-6), durante el Cuaternario, la alternancia de climas secos y húmedos, asociados a las épocas glaciales e interglaciales respectivamente, han modelado la fisonomía de las cumbres y los escarpes constituyendo las formas que hoy en día conocemos. Una descripción más detallada de esta hipótesis está disponible en Schubert (1984).

HUBER 1989). Desde el Precámbrico, el modelado de las rocas expuestas de la Formación Matauí ha sido intenso, logrando disectar estas rocas casi insolubles y extremadamente resistentes y, de esta forma, generar parajes únicos en el planeta. La superficie de erosión Auyán-tepuy, que corresponde a los toques de las altas mesetas de la cuenca del Caroní, entre 2.000 y 3.000 m de altitud, ha seguido siendo erosionada hasta el presente. El grado de disección es muy avanzado, principalmente a lo largo de los gran-

des sistemas de fracturas verticales, y ha ocurrido por procesos activos de solución química del cemento que une las partículas arenosas que forman la roca y su desintegración o transporte posterior (SCHUBERT & HUBER 1989). El mismo proceso de arenización de las cuarcitas (MARTINI 1982), unido a la formación de conductos por tubificación («piping») (URBANI 1986), es responsable de la formación de cavernas en esta litología.

El Grupo Roraima ha sido intrusionado entre 1,7 y 1,5 Ga por cuerpos de diabasa de afinidad toleítica, los cuales se presentan como cuerpos discordantes (diques) y concordantes con la estratificación (sills), de grandes dimensiones (AGUERREVERE *et al.* 1939). Hasta 1992 se creía que las diabasas intrusivas estaban limitadas a las formaciones del Grupo Roraima infrayacentes a Matauí, pero en varios tepuys del macizo de Chimantá y en el Auyán-tepuy se encontraron cuerpos de diabasa que intrusionan las rocas de la Formación Matauí a diferentes niveles. También se halló en el tepuy Akopán una unidad de lutita roja pirofílica, intercalada en las cuarcitas de Matauí. Debido a que la reacción metamórfica para generar pirofilita, a partir de cuarzo y caolinita, requiere de por lo menos 3.000 m de enterramiento (URBANI *et al.* 1977), este dato evidencia que al menos 3 km de espesor de rocas del Grupo Roraima han sido erosionados desde el Precámbrico hasta el presente (BRICEÑO & SCHUBERT 1992). La superficie actual de las cumbres de los altos tepuys es en consecuencia el remanente de un largo proceso erosivo que acompañó al ascenso tectónico del Escudo (SCHUBERT *et al.* 1986).

El espesor máximo preservado de rocas del Grupo Roraima ha sido estimado en 4.000 m (BRICEÑO & SCHUBERT 1992, YÁNEZ 1985). Dentro del grupo, la Formación Matauí -que corona la serie- posee una potencia máxima del orden de 1.000 m y es la principal unidad formadora de escarpes (REID 1972). Los altos tepuys normalmente se elevan 1.000 a 2.000 m sobre las zonas bajas circundantes. A los escarpes suceden taludes montañosos y pedimentos que dan paso al relieve de las zonas bajas. En las zonas de talud normalmente aflora la Formación Uaimapué (infrayacente a Matauí), intrusionada por espesos cuerpos concordantes de diabasas. Hacia su contacto con la base de la zona de escarpe abundan los bloques de cuarcita caídos desde la parte alta del tepuy. En el tepuy Roraima las paredes externas alcanzan 700 m de desnivel y los taludes (que a veces presentan escarpes menores) se extienden por más de 1.000 m hasta las lomas, cuevas y llanuras de La Gran Sabana, a unos 900 m de altitud promedio en este sector.

Los estudios tectónicos realizados en zonas de tepuy (BRICEÑO & SCHUBERT 1985) indican que las rocas de Roraima han sido sólo levemente deformadas, desarrollándose pliegues amplios con flancos de suave buzamiento, y con longitudes de onda de decenas de kilómetros. Todos los tepuys mayores constituyen pliegues sinclinales en cubeta. Las zonas vaciadas entre ellos corresponden a extensos anticlinales desmantelados por la erosión. Los bajos ángulos de buzamiento han permitido el afloramiento en áreas extensas de un mismo tipo de unidad, que, en el caso de ser resistente a la erosión, tenderá a desarrollar una meseta (BRICEÑO & SCHUBERT 1992).

En las zonas de borde de las cumbres de tepuy se intensifica la fracturación. La meteorización química de las cuarcitas por las aguas de escorrentía, a lo largo de las diaclasas y planos de estratificación, produce el colapso de grandes bloques, controlando el retroceso vertical de los escarpes (POUYLLAU & SEURIN 1985). Es en estas mismas zonas de borde donde habitualmente se encuentran las simas y cavernas.

El mecanismo genético responsable de la formación de cavidades ha sido expuesto por URBANI (1986), GALÁN (1988, 1991) y GALÁN & LAGARDE (1988). La meteorización química de las cuarcitas disuelve el cemento silíceo intergranular haciendo que la cohesión de la roca disminuya exponencialmente; se produce así una decementación o arenización paulatina que torna la roca compacta en friable. En las zonas de borde cercanas a escarpes, donde hay una gran densidad de fracturas que pueden alcanzar mucha profundidad, éstas sirven de vías de penetración para que el proceso de arenización continúe hacia abajo y eventualmente pueda extenderse lateralmente a través de los planos de estratificación (Fig. 2). Cuando la porosa y permeable zona decementada, en torno a las vías de penetración del agua, alcanza o es alcanzada por una superficie abierta (pared exterior del tepuy o superficie de un valle o cañón a una cota inferior) en esta zona de menor cota del sistema empieza a actuar el proceso de formación de conductos (tubificación o piping), el cual podrá avanzar formando gale-

rías en algunas partes del sistema. En un principio éstas podrán funcionar en condiciones freáticas, lo cual facilita aún más la formación de conductos. Posteriormente, al aumentar sus secciones (y/o disminuir el caudal de agua) podrán pasar a condiciones vadosas, donde la erosión y los colapsos pueden ser factores muy importantes para incrementar sus dimensiones (URBANI 1986).

Aunque el modelo expuesto es aplicable a la mayoría de las cuevas conocidas, falta aún investigación adicional para explicar por ejemplo la causa por la cual en algunas cavidades se observan niveles más arenizados que otros a pesar de que aparentemente estaría involucrado el mismo tipo de roca, o cuáles son los factores controladores de la ubicación y trazado de las cavidades conocidas (URBANI 1986).

Los mecanismos invocados para la formación de cavidades en cuarcitas son esencialmente los mismos que intervienen en la génesis de macro y microformas de superficie, residiendo la alternativa clave para explicar el cavernamiento en que se produzca la interconexión subterránea de las zonas arenizadas, y se logre capturar la infiltración vertical, canalizándola subterráneamente, de modo preferente (GALÁN 1988).

Los datos obtenidos en el Sistema Roraima Sur arrojan algo de luz sobre estos aspectos y sobre los factores que intervienen en el proceso de cavernamiento en cuarcitas.

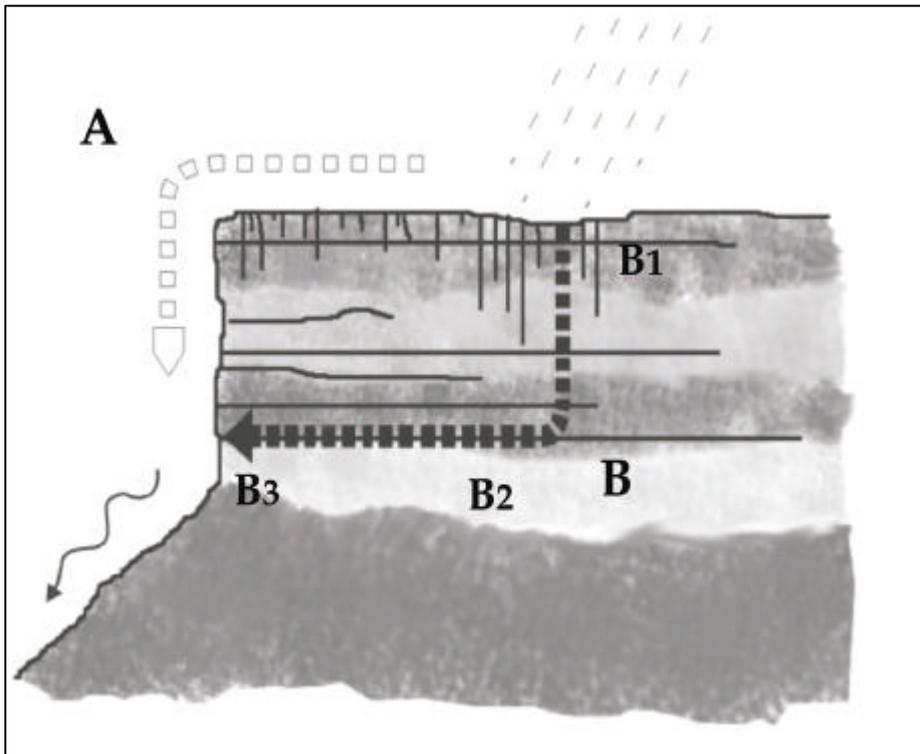


Fig. 2. Esquema de la circulación de las aguas en un perfil de tepuy. Con la letra A se representa el drenaje superficial o epígeo de las aguas provenientes de la precipitación. Este drenaje es el más frecuente y conlleva a la formación de cañones, torres, bloques y demás formas de superficie. Con la letra B se designa a la circulación subterránea o hipógea, que ocurre a favor de fisuras (B_1) y/o estratos de roca más débiles (B_2) y, por medio de la disolución de la roca, da origen al cavernamiento.

RESULTADOS

Observaciones de campo en superficie

La cumbre del tepuy Roraima presenta sus mayores elevaciones topográficas en la parte Sur. Sobre la pared exterior o escarpe Sur se puede apreciar la estratificación, sensiblemente horizontal. La parte central del escarpe (unos 2 km de ancho) es muy compacta, mientras que a E y O la pared está surcada por grandes fracturas verticales. De algunas de ellas se desprenden altas cascadas que proceden de cañones que recortan el borde. En la base de la parte central existe una surgencia caudalosa que emerge de un boquete en la pared formando una cascada de 4 m de altura. Esta surgencia está a unos 600 m de desnivel bajo la cumbre. Por debajo de esta surgencia existen otros manantiales que emergen entre los bloques del talud. En el tope del tepuy, sobre esta parte central, se localiza el sistema de cuevas.

Observaciones más detalladas en cumbre muestran que sobre el borde del escarpe Sur se encuentran las posiciones más elevadas de la serie

estratigráfica, recortadas desigualmente por la erosión del relieve. El buzamiento de los estratos de cuarcita es generalmente NW y de bajo ángulo, comprendido entre 10° y 0°. El buzamiento es mayor cerca del borde y se suaviza y pierde inclinación hacia el N, dando paso a extensas zonas con estratificación horizontal. Existen variaciones locales cerca del borde, probablemente debidas al basculamiento de bloques cortados por fracturas. Así en diversos puntos medimos buzamientos O y N.

Vista la pared exterior de frente, da la impresión de que su parte E buza hacia el tramo central, plano, donde se desarrolla la cavidad, mientras que al O de este tramo el buzamiento es ligeramente hacia el E. Geométrica o espacialmente, nuestras observaciones sugieren que la cavidad se desarrolla hacia la charnela de una amplia cubeta sinclinal, asimétrica. El plano axial del pliegue tiene un azimut N, con ligera pendiente del eje axial hacia el N, donde las capas se tornan horizontales al alejarse de la pared. Este dispositivo estructural es cortado tangencial u oblicuamente por el borde del escarpe S.

Topográficamente la cumbre es muy plana, aunque alterna zonas bajas y planas con pequeñas elevaciones fracturadas. La monotonía sólo es interrumpida por la existencia de una serie de buttes o mesetas-testigo que se elevan unos 50 m sobre las áreas planas circundantes. Estos buttes son como pequeños tepuys en miniatura, es decir, con un área tabular, contorneada por paredes verticales de hasta 20-30 m, y seguidos de taludes inclinados con numerosos bloques desprendidos. Las mayores altitudes del Roraima se alcanzan en las cumbres de estos buttes.

La parte NW de la cumbre, frente al Kukenán, muestra un ligero declive topográfico hacia el E. La estratificación observada en el escarpe NW, bajo el tope, es en bancos gruesos, con estratos individuales de hasta 10 m de espesor. Esto contrasta con el escarpe Sur, donde la estratificación de los tramos superiores es en bancos desiguales pero muchísimo más delgados. En este sector NW encontramos un río epígeo que se sume al alcanzar una grieta vertical paralela al borde NW, a unos 100 m de distancia de dicho borde. En la pared externa se aprecia que mana agua a través de los planos de estratificación, a distintas alturas, pero sin llegar a formar cavidades penetrables. La sima-sumidero por donde desaparece el río tiene en superficie 1 m de ancho por algo más de 5 m de largo, pero a unos 5 m de profundidad se estrecha en grieta impracticable, muy larga pero de escasos 10 cm de anchura.

Esto sugiere que en muchas zonas de borde se establecen pequeñas circulaciones subterráneas, a través de diaclasas y planos de estratificación, pero sin llegar a formar cavidades apreciables. Estas podrán evolucionar generando grietas y cañones abiertos, o el terreno podrá ser desmantelado hasta un estrato límite, sin llegar a formar cavidades. La alternativa opuesta -la formación de simas y cuevas- parece ser la excepción. Por simple lógica, si esta alternativa fuera común, las cavidades serían muy frecuentes, cosa que no ocurre. La arenización de las cuarcitas es así una condición necesaria, pero no suficiente, para la formación de cavernas. Es necesario que predomine la tubificación (piping) sobre la erosión de superficie, para que lleguen a formarse conductos mayores y galerías subterráneas.

Litología y relieve

La zona central del borde Sur, donde está el sistema de cuevas, es el área observada con mayor detalle, pero apenas sobre una franja paralela al borde de 2 km de largo por 1 km de anchura.

Las rocas de la Formación Matauí que afloran en el área alternan dos tipos de unidades litológicas. La primera (U1) está constituida por cuarcitas de grano medio a grueso, en estratos de unos 2-3 m de espesor; algunos de ellos muestran ejemplos de estratificación cruzada lineal de ángulo alto y de estratificación cruzada en cubeta. La segunda (U2) está formada por cuarcitas de grano fino a muy fino con estratificación plana delgada; generalmente se dispone en estratos delgados, de 20-30 cm de espesor, pero existen también algunos estratos más gruesos, de hasta 1-2 m de espesor; muchos planos de estratificación presentan rizaduras de oleaje (ripple-marks) características; algunos estratos de la serie presentan también estratificación cruzada planar o laminación gruesa, de ángulo bajo a medio, intercalados entre las cuarcitas de estratificación plana.

Cada unidad tiene una potencia variable (5 a 20 m), y se alternan de modo monótono en la parte superior de la serie de la Formación Matauí. Sobre la zona de las cuevas se distingue una secuencia de cinco unidades U1 y U2. Esta secuencia, vista de lejos, sobre la pared exterior, da en su conjunto la impresión de ser una estratificación delgada, que abarca los 50-100 m superiores de la pared, mientras que por debajo la estratificación parece mucho más gruesa, con estratos individuales de unos 5 m o más de espesor.

Las unidades U1 parecen ser más resistentes a la erosión y soportan en la zona los relieves más compactos y planos de la cumbre del tepuy: tope de buttes o mesetas-testigo, tope de zonas intermedias alomadas, plataformas y depresiones de fondo plano con lagunas y turberas. Las unidades U2 son más friables y en ellas la densidad de fracturas es mayor; soportan los relieves más accidentados y caóticos: taludes intermedios entre buttes y zonas planas (con caos de bloques desprendidos de la unidad superior); campos de zanjones y grietas; campos de torrecillas y paisajes ruiformes (con arcos, puentes de roca, figuras y torres). Algunas de estas últimas presentan un avanzado estado de arenización de las cuarcitas de grano fino y generalmente están coronadas por un estrato muy silicificado más resistente.

El espesor observable de estas unidades en el relieve existente es variable, ya que suelen estar denudadas y rebajadas en distinto grado por la erosión. No obstante, en el perfil superficial, se aprecian numerosos entrantes y salientes en las cuarcitas de estratificación delgada y grano fino, mientras que las unidades de estratos más gruesos y grano grueso presentan paredes verticales o redondeadas más lisas y uniformes, con sólo algunos entrantes (a veces formando abrigos y cornisas) correspondientes a la erosión sobre los planos de estratificación, espaciados unos de otros en varios metros.

Topográficamente, en la zona de las cuevas, existe un alto y extenso butte que sobresale en el relieve (a una cota próxima a 2.800 m s.n.m.) y zonas más bajas con lomas aplanadas que sepa-

ran plataformas y depresiones de fondo plano con lagunas y turberas (unos 50 m más bajas en altitud). Las lomas entre depresiones, subaplanadas o en declive, terminan con pendientes abruptas (de 10 m de desnivel) sobre las planicies deprimidas.

El Subsistema 1 de Roraima Sur se desarrolla preferencialmente en la segunda unidad U2, pero sus dos bocas verticales perforan la unidad U1 suprayacente hasta alcanzar el nivel subhorizontal de galerías. Otras dos bocas horizontales se forman en la primera unidad U2 (bajo la base del butte U1 superior), pero progresan oblicuamente erosionando (al igual que las simas) la segunda unidad U1, de unos 12 m de potencia, para enlazar con la red principal. La mayoría de las bocas se sitúan a menores cotas, drenando dos amplias depresiones de fondo plano instaladas sobre la tercera unidad U1. La red principal de galerías alcanza su punto más bajo al interceptar una pequeña falla de rumbo, dextral, sobre la cual se instala otra de las bocas de sima, que alcanza 18 m de desnivel. El drenaje subterráneo se pierde al otro lado de la falla entre planos de estratificación estrechos e impenetrables, probablemente por ponerse en contacto a uno y otro lado de la misma términos distintos de la serie estratigráfica.

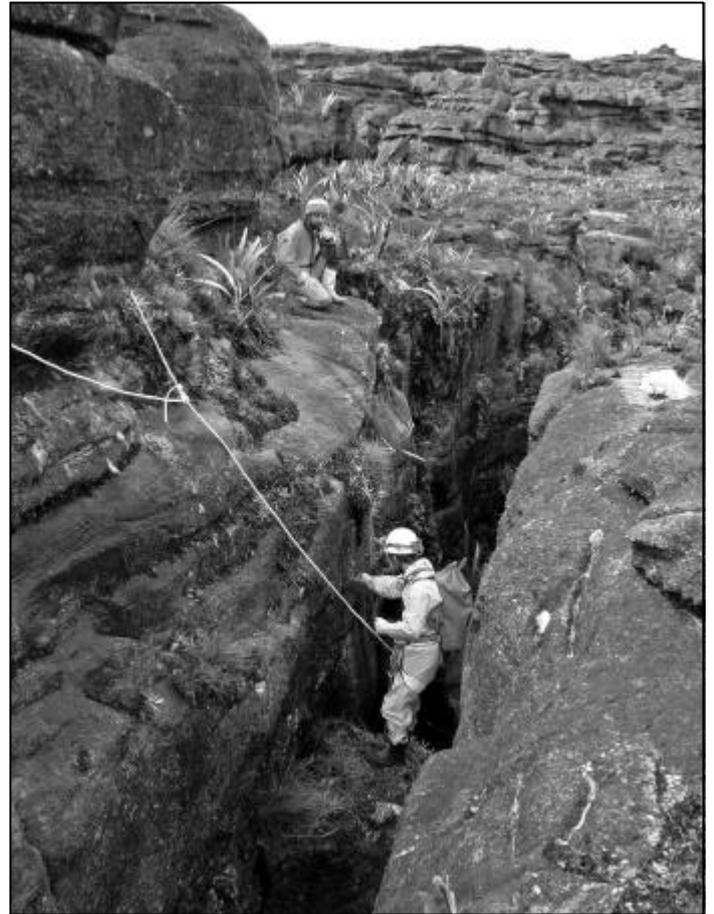
El Subsistema 2 de Roraima Sur se sitúa a unos 200 m al O de este punto y perfora verticalmente la tercera unidad U1. La vertical de acceso (Sima 2), de 27 m, enlaza con otro nivel horizontal de galerías, más bajo topográficamente que el primero, también en cuarcitas de grano fino. Esta sima captura el drenaje de superficie de una depresión de fondo plano (es una sima-sumidero), pero además, en profundidad, la red hídrica subterránea, que es casi horizontal, presenta afluentes subterráneos que proceden de la zona anterior y de otras zonas planas existentes a ambos lados del colector. La horizontalidad mayor del Subsistema 2 hace que presente lagunas y zonas inundadas más extensas que en el Subsistema 1.

El drenaje subterráneo del colector se dirige hacia el W, donde existe una zona deprimida plana, surcada por un cañón y fracturas menores que no alcanzan a interceptar la pared externa del tepuy. Bajo esta zona de fracturas se instala una zona de infiltración vertical (que de momento se ha revelado no penetrable) la cual deriva las aguas subterráneas hacia las surgencias, situadas cientos de metros más abajo.

Descripción de la cavidad

El sistema Roraima Sur constituye una única cavidad, interconectada, con 18 bocas (Fig. 3). Consta de una red predominantemente horizontal la cual sigue el bajo buzamiento de los estratos de cuarcita. El sistema se desarrolla a poca profundidad bajo la superficie, existiendo varias simas, del orden de 30 m de desnivel, que enlazan desde superficie con la red horizontal. Las bocas inferiores, abiertas como ventanas al vacío de la gran pared exterior del tepuy, están hasta a 70 m bajo el nivel de la cumbre.

El sistema posee un total de 18 bocas: 6 bocas de cueva, 8 bocas de sima y 4 bocas abiertas en la pared. Las 6 bocas de cueva y 2 de sima (B1 a B8) permiten acceder al subsistema de cueva 1. Sima 2 constituye el acceso al subsistema 2, el cual posee un total



Equipando una de las simas de acceso al Sistema Roraima Sur (Foto: R. Carreño).

de 6 bocas de sima (S1 a S6) y las bocas (E1 a E4) de la pared exterior (inaccesibles o difícilmente accesibles ya que la pared posee techos extraplomados sobre ellas). Una galería de techo bajo de difícil exploración, que se inunda en caso de crecida, constituye la conexión entre ambos subsistemas (Ver descripción completa y planos de la cavidad en la sección de Catastro).

En el interior de la red, hay varias zonas de trazado laberíntico y techos bajos (laminadores) sujetos a inundación total en caso de crecida. Debido a la fluctuante meteorología de la región y a que varias bocas del sistema son importantes sumideros, los ríos subterráneos que recorren las galerías activas tienen una rápida respuesta a las precipitaciones y los caudales de crecida en época seca en el río colector alcanzan más de 1 m³/s, elevando en varios metros la altura de los lagos interiores e inundando completamente diversas zonas de techo bajo. Pequeñas galerías afluentes, habitualmente secas, llevan agua de modo intermitente, a tenor de la cuantía de las lluvias. Estas variables y el hecho de que algunas galerías tienen zonas con agua todo el año, determina que en las exploraciones llegue a pasarse frío al estar mojados. La dificultad vertical de la cavidad es reducida, limitándose a las simas de acceso y a algunas pequeñas y fáciles escaladas interiores.

El subsistema 1, de 6 km, consta esquemáticamente de 4 grandes galerías, entrelazadas por galerías menores y con redes laberínticas anexas. La boca 1 (boca superior, cota 0) da acceso a una amplia galería fósil (Galería Oeste), que alterna pasos estrechos y se vuelve activa en su mitad inferior, al recibir las aguas que ingresan a través de dos cascadas en su bóveda. La boca 2, tras un salón de entrada en fuerte declive y un conducto estrecho, conduce a una amplia galería fósil, paralela a la principal (Galería Paralela). La boca 3, oculta entre bloques, es el sumidero de una amplia depresión y origina la Galería Central, recorrida por un pequeño río, con diversas cascadas y estanques de agua. Otra amplia galería (Galería Este) captura el drenaje de otra amplia depresión adyacente. Las galerías Paralela y Este convergen con la Central. Las aguas subterráneas desaparecen en sumideros impracticables al alcanzar la base de una boca-sima de -18 m de desnivel (B8, cota -42).

La Galería Oeste enlaza en su parte media con la Galería Paralela a través de un conducto de sinuoso trazado y techo bajo, en el que fue necesario excavar el relleno de arena del suelo para pasar físicamente de una a otra galería. En su prolongación posee además dos conexiones adicionales igualmente estrechas.

La parte final de la Galería Oeste presenta zonas de techo bajo, con agua, en las que se encontró el tramo «clave» que permitió enlazar con el segundo subsistema (Conexión, cota -53). El trazado general de las galerías del subsistema 1 sigue una dirección N.

El subsistema 2, de 4,8 km, consta de dos bocas de sima en paralelo, de -27 m de desnivel y una red laberíntica e inundada inferior. La sima de acceso (Sima 2) drena una tercera zona deprimida y por su boca ingresa una cascada permanente, muy caudalosa en caso de lluvia. Una red horizontal y laberíntica de galerías enlaza ambas simas. Estas galerías aunque amplias son de techo bajo y están inundadas con 1 m de agua. Unos pasos entre bloques permiten acceder a la Galería del Río, que es el colector del sistema.

Río arriba la galería se obstruye, pero una galería en desviación que regresa hacia la sima de acceso presenta un lateral de techo muy bajo que permite alcanzar el paso clave de conexión con el subsistema 1.

Río abajo las aguas reaparecen bajo derrumbes y se accede a una muy amplia galería colectora (Galería del Río). Esta alcanza anchuras de 20 m y presenta grandes lagos o estanques, alternantes con pequeñas cascadas en su recorrido. El trazado de la red pasa a tomar una dirección W-NW. El río recibe diversos afluentes, procedentes de galerías menores. El caudal principal del colector desaparece en varios puntos, a través de fisuras existentes bajo un suelo de bloques de un tramo amplio tipo salón, en la cota -65. No obstante, en la continuación de la Galería del Río aparecen nuevos estanques de agua y pequeños cursos afluentes que forman de nuevo un río, menos caudaloso que el del tramo previo, el cual prosigue 200 m hasta otra zona de sumideros bajo bloques en la cota -72, que constituye el sumidero terminal. Poco después se alcanza una bifurcación desde la que parte una corta galería seca que conduce a la boca principal inferior, E1, cota -70, abierta a una cornisa de la pared exterior.

En su proximidad hay un complejo laberinto de galerías, una de las cuales asciende con varias escaladas hasta otra pequeña boca en la pared (E2).

La Galería del Río presenta en la parte media de su recorrido dos importantes laterales fósiles de dirección S-SE y ascendentes. El primero de ellos (Galería del Merey) asciende hasta un escalón vertical de +6 m, tras remontar el cual se alcanza otra boca en la pared (E3). El segundo (Galería de las Claraboyas) discurre en paralelo y enlaza con el anterior en su parte media. En su recorrido pasa bajo la base de 4 bocas de sima (claraboyas), de 30 a 15 m de desnivel, y asciende hasta una cuarta boca abierta en la pared (E4, cota -37), a poca distancia de un cañoncito de la cumbre.

El subsistema 2 presenta retículos de laterales laberínticos, pero mucho menos extensos que en el subsistema 1. Los situados al N del lateral del Merey drenan una extensa zona plana, fisurada, y aportan importantes caudales en caso de lluvia. Como puede verse las aguas subterráneas del sistema desaparecen bajo bloques y a través de fisuras en dos zonas distintas de sumidero, y reaparecen 700 m de desnivel más abajo, a través de una serie de surgencias situadas en la base y talud de la pared exterior SW.

La red de galerías subterráneas está incluida en un rectángulo de 1.200 x 600 m. Pero si consideramos las áreas planas e impermeables contiguas, cuyo drenaje epígeo es capturado por las bocas-sumidero, el área total del sistema alcanza 2 km².

Todas las galerías se desarrollan a expensas de planos de estratificación, siguiendo el buzamiento local de los estratos. En la Galería Oeste del subsistema 1 (que ocupa la posición S más próxima al borde del tepuy) el buzamiento es más acentuado que en el resto de la cueva (12° a 7°). En las otras galerías el buzamiento es progresivamente más suave hacia el N, tendiendo a la horizontal.

Lo más importante a destacar, que se observa en el interior de la cavidad pero no en superficie, es que en las cuarcitas de estratificación delgada se presentan intercalaciones centimétricas a milimétricas de limolitas y lutitas, mucho más friables. Igualmente existen bancos de cuarcita de grano muy fino y con alto contenido en hierro, probablemente también más friables. El residuo de la arenización de estas rocas deja depósitos de arena muy fina de un característico color rojizo, muy abundantes en el plano principal de excavación de laterales en el sector Sur de la cueva, entre las galerías Central y Este. En varios puntos de la galería Paralela y en las cercanías de la boca B7 hay un estrato de 20 cm de limolita claramente muy friable. La caverna parece así excavada a expensas de estas zonas de debilidad litológica, mayoritariamente, y de tramos de cuarcita de grano fino, relativamente más friables que las cuarcitas normales, minoritariamente.

La extensión lateral de estas zonas litológicamente débiles es incierta. La evidencia de su presencia no se observa en toda la cueva, sino localmente. Gran parte de estos niveles pueden ya haber sido removidos al excavar las galerías, quedando sólo testigos dispersos.

Las aguas de infiltración obviamente han aprovechado también los planos de estratificación. Es apreciable en muchos sitios que la estratificación delgada favorece el colapso de estratos del-

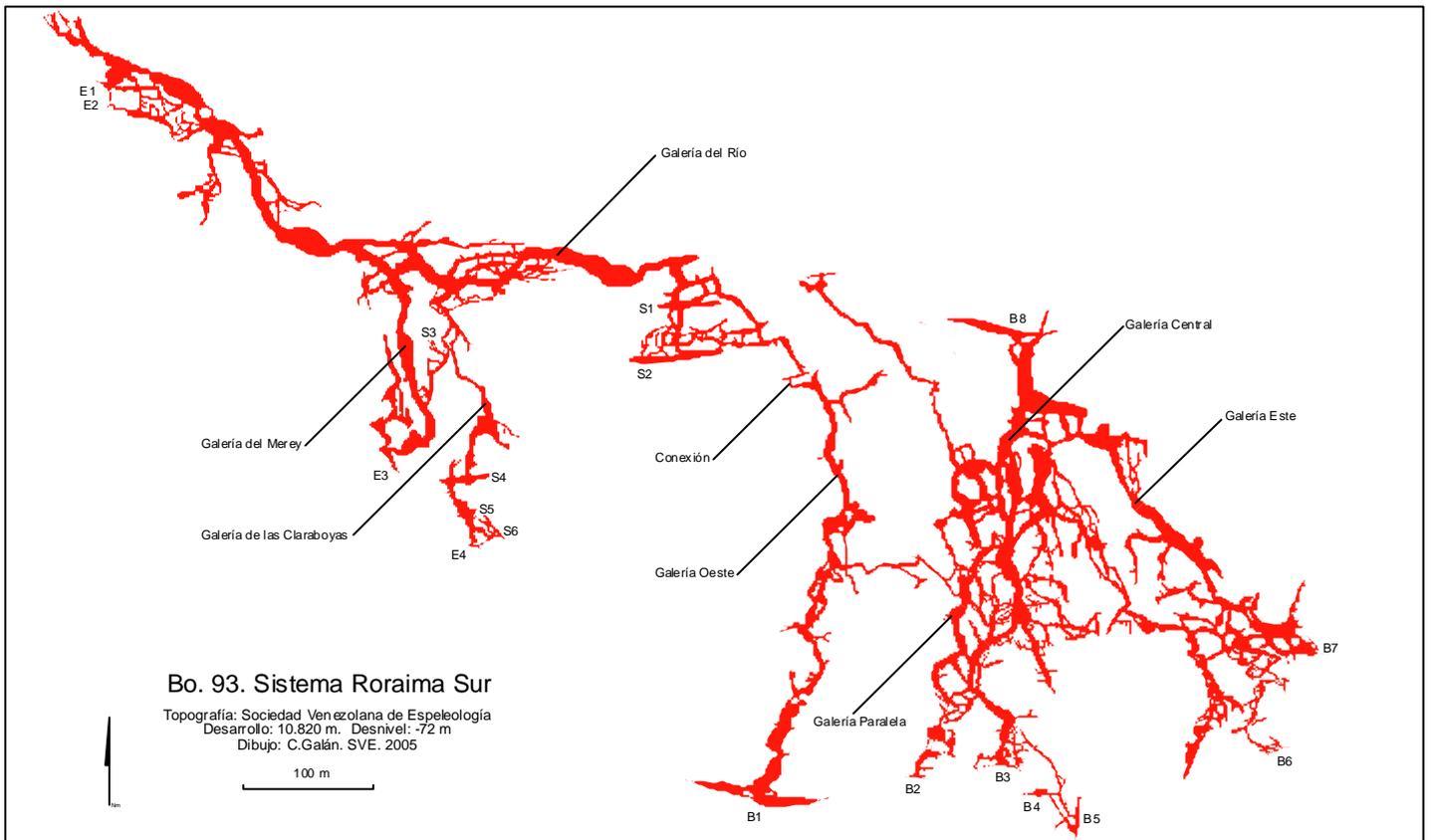


Fig. 3. Mapa esquemático de la planta del Sistema Roraima Sur, mostrando las principales galerías y accesos.

gados del techo, cuando la galería se amplía mucho hacia los lados. En las galerías quedan innumerables testigos de estos colapsos, y resulta también obvio que, si existe circulación hídrica en la base, las aguas circulantes pueden disolver y desintegrar los estratos caídos, facilitando la ampliación volumétrica de la cavidad.

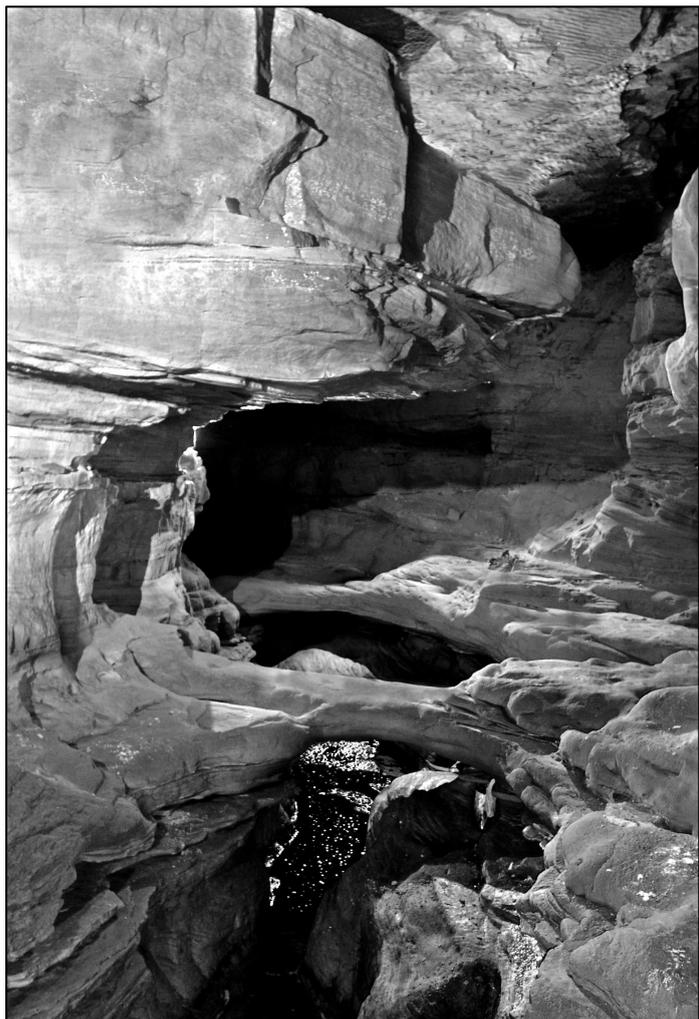
Morfología subterránea

La cavidad se asemeja a una típica cueva en calizas, con la singularidad de que presenta un predominio de galerías de sección rectangular (más anchas que altas, con techos y suelos planos), debido a la intersección de la estratificación horizontal con el diaclasado. Existen no obstante, galerías tubulares de pequeño diámetro y otras grandes, con bóvedas en arco o en domo, que han evolucionado por colapso de los estratos del techo hasta alcanzar un perfil de equilibrio. La cueva presenta numerosas formas de disolución y colapso, rellenos de arena (en las galerías fósiles), e innumerables y diversas espeleotemas de ópalo y goethita, y probablemente también de cuarzo, calcedonia y calcita.

Es destacable un modelado de formas suaves, redondeadas, sobre todo en las galerías o partes de éstas que presentan actividad hídrica. Los suelos de roca planos son predominantes en las gale-

rías principales. En algunos sitios, como ocurre también en los ríos de superficie del tepuy, existen pozas, marmitas de gigante, cubetas en forma de ollas y pequeños agujeros, producto tanto de disolución como de erosión turbillonar, algunos de ellos con el fondo lleno de cristales de cuarzo poco rodados de tamaño centimétrico. Otras formas observadas en las galerías hidrológicamente activas incluyen arcos y puentes de roca. Este conjunto de formas suaves, redondeadas y pulidas, parece ser el resultado de la disolución de la roca pero a la vez de la abrasión mecánica de los granos de arena transportados por las aguas durante los eventos de crecida.

Aunque resulta evidente la influencia del diaclasado en el colapso de estratos, la topografía de la red no sigue un patrón de diaclasamiento. O éste es tan heterogéneo y variable entre los distintos paquetes de la serie estratigráfica que no impone trazados rectilíneos. Si bien es cierto que muchos tramos topográficos siguen direcciones NNE y NW, con azimut muy variables, existiendo tramos N, W, o con las direcciones más diversas. La evolución de los conductos ha desdibujado los contornos, dando por resultado una red laberíntica. Existen además zonas con gran densidad de pilares de roca, aparentemente excavadas en régimen freático, a expensas de la estratificación, sin orientación predominante.



Puentes de roca en sucesión a lo largo de la Galería Central en el subsistema 1 (Foto: R. Carreño).

Las secciones típicas de galerías en ningún caso son estrechas y altas, siguiendo diaclasas verticales, con la excepción de las bocas de sima, invariablemente estrechas y muy largas (hasta 50 m de largo para 1-2 m de anchura). Siete de las ocho bocas de sima se orientan sobre fracturas E-W. Formas curiosas de disolución, encontradas sólo en la proximidad de la boca B3 de la Galería Central, incluyen simas o agujeros, de hasta 4 m de desnivel, excavados sobre diaclasas verticales de orientación SSW-NNE. De hecho la corriente de agua que penetra en esta boca excava su cauce a expensas de una de estas diaclasas, existiendo otras paralelas rellenas de agua. Pero el drenaje no prosigue a través de ellas, sino que cambia de dirección y circula siguiendo un plano de estratificación más bajo. Es decir, estas diaclasas han sido ampliadas sólo al perforar este estrato, y son un accidente transversal menor que corta la galería, pero sin continuación; las aguas las aprovecharon para profundizar verticalmente en la serie, pero las abandonaron para circular a expensas de planos de estratificación. Lo que confirma que son estos últimos los que ejercen un control estructural sobre el drenaje subterráneo.

La cavidad tiene un perfil longitudinal subhorizontal, concordante con el suave buzamiento de las capas, y se torna prácticamente horizontal sobre largos tramos en su parte N. A lo largo de 1.200 m de extensión de la red, el desnivel es de 72 m. La Galería del Río desciende sólo 16 m a lo largo de 600 m de extensión.

El perfil longitudinal de la galería principal muestra un encajamiento progresivo del cauce, como ocurre también en cauces permanentes en la superficie del tepuy, presentando pequeños escalones a lo largo del recorrido, los cuales entallan la serie estratigráfica. En muchos puntos se forman pequeñas cascadas escalonadas, de varios centímetros hasta 1 m de altura. Sólo en un punto del recorrido del subsistema 1, donde se ha formado una sala amplia, existe un escalón con cascada de 5 m de desnivel.

Donde el trabajo de las aguas ha sido más intenso, han sido entallados los cauces, dejando colgadas galerías laterales, elevadas unos metros con respecto al nivel actual de circulación del drenaje.

Los rellenos de grandes bloques cúbicos son comunes en todas las entradas de cueva y se generan por el colapso de los estratos gruesos que forman el techo de la cavidad. Ya ha sido indicado que el drenaje epígeo pasa a las galerías interiores a través y bajo ellos. En el interior de la cueva hay también tramos con rellenos de bloques formados por colapso de paredes y techos, más notorios en las salas y ampliaciones mayores. Pero existen también, y de hecho son más abundantes en todas las galerías, los colapsos de estratos delgados, centimétricos, que generan lajas y bloques tableados.

En las galerías de pequeña sección, y en muchos laterales hoy inactivos, los suelos poseen extensos rellenos de arena fina, evidencia del proceso de arenización de las cuarcitas por disolución intergranular.

Como la circulación vadosa actual ejerce su poder erosivo a nivel del suelo y base de las paredes, muchos perfiles están excavados también en escalera, positiva o negativa. En las zonas de mayor actividad hídrica, la disolución degrada los bloques desprendidos y el flujo transporta y evacua los rellenos detríticos, dejando de esta forma grandes suelos de roca lisa, constituidos por el estrato resistente por donde circula el agua. Esto es particularmente notable en la gran Galería E y en la Galería del Río.

Entre los depósitos secundarios de la cavidad se encuentran espeleotemas. Estas son relativamente abundantes -para cuevas en cuarcitas- y diversas. Su mineralogía está actualmente en estudio, sin embargo, resultados preliminares son mostrados en Carreño (2004, este mismo ejemplar).

En la cueva son observables también diversas estructuras primarias de las cuarcitas de grano fino, especialmente rizaduras. Estos se observan tanto en la roca caja que constituye el suelo o el techo de la cueva como sobre planos de estratificación de bloques desprendidos. Localmente, en la serie de cuarcitas de grano fino, se observan intervalos con estratificación cruzada planar de ángulo bajo a medio, intercalados entre tramos con estratificación plana en unidades delgadas.

En la superficie, sobre las zonas que forman lomas aplanadas entre depresiones, es frecuente que algunas diaclasas verticales

hayan sido ampliadas formando corredores. El paquete superior es de cuarcitas de grano grueso aparentemente más resistentes; bajo él las cuarcitas de grano fino y estratificación delgada han sido erosionadas a lo largo del plano vertical hasta otro estrato resistente, donde el corredor se amplía. Estos corredores tienen así la forma de una T invertida, siendo su profundidad media de entre 3 y 10 m, y su longitud desde unos pocos hasta varias decenas de metros. En algunos casos quedan tramos techados que forman cortos túneles a lo largo de los corredores, con ventanas que semejan simas, pero en realidad el drenaje es superficial, limitado a la base de los corredores, donde se concentra el flujo de agua tras las lluvias. Entre las bocas B3 y B7, y en la parte alta de la loma próxima a Sima 2, hay diversos ejemplos de este tipo. Sin embargo, en la red de la cueva infrayacente, las aguas subterráneas han perforado toda la serie, incluyendo varios de los paquetes de estratificación gruesa aparentemente resistentes.

Esta morfología en T invertida se presenta igualmente en la mayoría de las simas. En S1 y S2 por ejemplo, las verticales de 27 m tienen apenas una anchura de 1-2 m. pero en su parte basal se amplían hasta 7-8 m.

Hidrología

El tepuy Roraima está situado a 5° de latitud N, en el denominado Ecuador meteorológico. El régimen de lluvias en la región está comandado por el desplazamiento anual de la ITCZ (Zona de Convergencia Intertropical), una extensa banda de bajas presiones que rodea toda la Tierra y que determina gran parte de la meteorología mundial. La región presenta elevadas precipitaciones, con un período «seco» poco marcado, que abarca los tres primeros meses del año (GALÁN 1984). A pesar de estar en una zona tropical, la altitud de la cumbre determina que las temperaturas sean templadas (aguas subterráneas a 12°C). En superficie la temperatura ambiente oscila diariamente entre 25°C y 5°C por término medio (GALÁN 1992).

Hasta hace poco se estimaba que la precipitación en la cumbre del Roraima era del orden de 4.000 mm/a, pero datos recientes muestran que el área de Roraima - Kukenán constituye uno de los núcleos de altas precipitaciones de la cuenca del río Caroní y recibe 5.700 mm/a (CVG – EDELCA 2004). Las cumbres de estas montañas, expuestas a vientos de componente E (NE a SE), reciben todas las nubes procedentes de las selvas bajas de Guyana. La mayoría de los días del año la cumbre de Roraima permanece cubierta, con frecuentes lloviznas y lluvias, intercaladas con claros en los que la radiación solar incidente es fuerte. La topografía plana y casi enteramente rocosa de la cumbre determina que las aguas de lluvia caídas fluyan con rapidez para generar altas cascadas al alcanzar los bordes de la meseta. Cada km² de superficie de cuenca genera un caudal medio de 154 l/s, con puntas de crecida de más de 2 m³/s.km².

Durante el período lluvioso los promedios mensuales pueden alcanzar 700 mm/mes. En contraste, durante la época seca el promedio mensual puede descender hasta 60-80 mm/mes, es decir, 10 veces menos. Pero estas cifras expresan sólo valores medios de

precipitación. El resultado hidrológico local es aún más contrastante.

Debido a la inexistencia de suelos bien desarrollados sobre el tope del tepuy, la respuesta a las precipitaciones es muy rápida, ya que el agua caída circula sobre suelos de roca impermeable casi sin retardo (las turberas suelen permanecer empapadas y su efecto regulador sobre el flujo del agua es muy pequeño o inexistente). La lluvia caída en un evento de lluvia diario, sobre un área pequeña, fluye laminarmente y se concentra en los puntos de sumidero con gran rapidez, generando crecidas de caudal que sorprenden por su magnitud, incluso en época seca. En las bocas-sumidero del sistema Roraima Sur (S2, B3, B7) normalmente ingresan caudales de estiaje de 10-20 l/s, pero hemos tenido ocasión de observar en la sima S2 crecidas de 400 l/s tras una noche lluviosa en época «seca». El caudal medio del colector subterráneo, estimado en 250 l/s, puede superar 1 m³/s en tales eventos, pudiendo experimentar crecidas aún más considerables en época lluviosa.

Con tal régimen hídrico puede comprenderse que los ríos subterráneos son altamente competentes para arenizar la roca de las galerías, meteorizar los bloques desprendidos y evacuar los fragmentos detríticos. Las galerías activas de escaso diámetro pueden funcionar en condiciones freáticas parte del año. En las galerías sin circulación hídrica, o donde ésta ocurre de modo intermitente durante eventos de aguas altas, se depositan espesos relleños de arena, mientras que los cauces activos están casi desprovistos de tales depósitos.

En la zona donde se encuentra la cavidad existen varias áreas de topografía plana y compacta, a distintas alturas. La superior forma una cuenca deprimida (con respecto al relieve adyacente) que es drenada por la boca B3. Una segunda, algo más baja, es drenada por la boca B7. La sima S2 captura una tercera área plana. Y existe aún una cuarta área, situada al N del lateral del Merey y del colector, que captura agua a través de varias fracturas. Adicionalmente, sobre las lomas entre depresiones, existen fracturas menores que capturan el drenaje local de las superficies intermedias. El agua que ingresa formando una cascada en la Galería Oeste, por ejemplo, procede de un pequeño sector en el tope de un butte.

En conjunto, debido a que el borde Sur del tepuy está más elevado y con declive hacia el N, el drenaje superficial no escapa a través de cascadas. En la pared externa, sobre un sector central de algo más de 2 km de ancho, no se aprecian cascadas ni aún durante las lluvias. Tampoco hay ríos superficiales que se dirigen hacia el N. Por todo ello pensamos que el drenaje de toda esta área es esencialmente subterráneo y así lo confirman los ríos observados en el interior de los subsistemas 1 y 2.

El área sobre la red de la cueva es de 1.200 x 600 m. Pero si a ello sumamos las depresiones que drenan hacia las cuevas y las zonas intermedias entre ellas, el área total de alimentación del sistema alcanza 1,5 km². Estos datos han sido tomados como base para estimar el caudal medio del colector.

En cuanto a sus propiedades físico-químicas, las aguas de los ríos subterráneos (y también de los superficiales) son ácidas (pH entre 3 y 5), extremadamente pobres en electrolitos y nutrientes, y



Circulación hipógea de las aguas en la Galería del Río (Foto: R. Carreño).

de una gran transparencia debida a la virtual ausencia de sedimentos. En masa toman una coloración té característica («aguas negras» de los ríos de Guayana), debida a ácidos húmicos y fúlvicos aportados por la vegetación. Estas aguas son netamente subsaturadas en sílice (concentraciones medidas en diversos tepuys dan valores de entre 1 y 6 mg/l, con un promedio en torno a 2 mg/l) (GALÁN 1991). No obstante, la sílice y el hierro pueden migrar a través de planos de debilidad de la roca y precipitar en forma de ópalo y de oxi-hidróxidos de hierro, recementando las cuarcitas en la adyacencia de dichos planos y haciéndolas más resistentes a la erosión. La mejor evidencia de esta movilización y precipitación en las cuevas es la presencia de espeleotemas de ópalo y goethita, y la existencia de planos de estratificación rellenos de costras de ópalo. Probablemente la existencia de conductos y galerías aireadas facilitan la evaporación y precipitación de sílice amorfa en la vecindad de los conductos. Así, de modo similar al karst clásico en calizas, las aguas de infiltración en cuarcitas pueden disolver la roca para formar galerías aéreas y pueden luego precipitar generando espeleotemas y depósitos secundarios.

El sistema subterráneo

El drenaje subterráneo de la cavidad se dirige hacia una zona de fracturas verticales que profundiza en la serie de la Formación Matauí para derivar hacia las surgencias. Esta zona ocupa un área plana deprimida al N del extremo O de la cavidad y está surcada por una zanja o cañón (y otras fracturas anexas) que aparentemente no alcanzan el borde externo. Esa especie de cañón es el sumidero de una amplia cuenca y cuando llueve varios riachuelos caen en cascada a su interior. El sector no ha sido revisado en detalle, como tampoco el área de surgencia, pero está muy próximo a los puntos de sumidero en el interior de la cueva. Es probable

que no se trate de un único conducto sino de varios drenes verticales en paralelo. Lo que a su vez podría explicar la surgencia múltiple de las aguas en la zona de talud y base de la pared externa.

Una hipótesis alternativa es que el drenaje subterráneo se dirija hacia el N, hasta interceptar alguna otra pared externa. Creemos que tal hipótesis es poco factible, por varias razones: la gran distancia que existe hasta otros bordes, la horizontalidad de la estratificación al alejarse del borde S, la mayor compacidad y menor fracturación de la roca en las zonas centrales. El gradiente hidráulico tendría que ser muy elevado para permitir una circulación extensa de este tipo.

Lo hasta ahora conocido en las cuarcitas del Grupo Roraima muestra que las cavidades se originan según

dispositivos en «reloj de arena» (URBANI 1986), es decir, dispositivos en los cuales la formación de conductos y galerías parece limitarse a sólo algunas partes del sistema, en la zona superficial o en la de surgencia, estando obstruidos o poco desarrollados los conductos en la parte media.

Según las hipótesis clásicas relativas al comportamiento mecánico de las rocas (RENAULT 1971), en todo macizo elevado sobre los terrenos adyacentes, los fenómenos de descompresión mecánica y apertura de fisuras se presentan en la zona superficial del macizo y se incrementan notablemente en las zonas de borde. En macizos tabulares como los tepuys, la apertura mecánica de grandes fracturas verticales se produce con facilidad por descompresión de la roca al lado de grandes vacíos, como los de los grandes escarpes externos (o grandes cañones internos), pero no en las compactas zonas centrales.

El establecimiento de una red subterránea extensa requiere, desde sus etapas iniciales, que el sistema pueda drenar hacia una zona de surgencia, es decir, que exista una interconexión de las zonas arenizadas para permitir el desarrollo de la tubificación, y esto difícilmente se produce en las cuarcitas al alejarse de las zonas de borde de tepuy. Por todo ello, en nuestra opinión, es muchísimo más factible la primera hipótesis.

En el sistema Roraima Sur, sometido a bruscas variaciones hidrológicas, hay evidencias que permiten postular una evolución del sistema a lo largo del tiempo. Los procesos de arenización de la cuarcita están en relación con el tiempo de residencia del agua en el acuífero y con su flujo o velocidad de renovación. Cuanto mayor es el tiempo de contacto entre la roca y el flujo de agua, más se facilita la disolución intergranular y la evacuación de la sílice disuelta. La tubificación y el transporte de granos de arena y fragmentos detríticos se facilita en las zonas con drenes que concentran el flujo de agua.

Actualmente, en los ríos de régimen permanente en zona vadosa, se ve facilitada la excavación y desarrollo volumétrico de galerías amplias, mientras que en las galerías con pequeños drenajes éste es a menudo en régimen temporal, con un débil flujo laminar y tramos en parte freáticos. Muchas de estas galerías forman afluentes que convergen con los ríos principales a un mismo nivel, mientras que los laterales prácticamente abandonados por las aguas (grandes o pequeños) a menudo han quedado colgadas unos metros por encima de los cauces principales, con toda una serie de situaciones intermedias. Sin embargo, no puede decirse que existan en la red varios pisos o niveles superpuestos de galerías.

Las galerías hidrológicamente inactivas, no han quedado abandonadas por las aguas simplemente al profundizar o entallarse el drenaje subterráneo, sino -sobretudo- porque han perdido sus áreas principales de alimentación como producto del desmantelamiento y/o rebajamiento de superficie, ocurrida al progresar la erosión superficial. Las actuales galerías activas aprovechan, no sólo la infiltración local, sino que capturan el drenaje superficial de áreas deprimidas adyacentes, rebajadas por la erosión de superficie a lo largo del tiempo.

Así, las galerías hoy observables tienen distintas edades. Las galerías activas continúan siendo excavadas hasta el presente, es decir, son galerías actuales, en pleno crecimiento. Las galerías fósiles o inactivas -producto del desmantelamiento del relieve superficial y del retroceso de la pared externa- deben ser más antiguas cuanto más elevada sea la posición que ocupan sus bocas o tramos superiores en la serie estratigráfica.

Si tenemos en cuenta que el rebajamiento de superficie en las cuarcitas de Roraima tiene valores medios del orden de 2 m por millón de años (GALÁN 1984, 1991, SCHUBERT & HUBER 1989) y que la galería más alta (Galería Oeste) está situada a 20-30 m por encima de las principales bocas activas (B2, B7, S2), tal galería -probablemente la más antigua que se conserva del sistema- pudo haberse formado hace más de 10 millones de años. Las galerías de las Claraboyas y del Meray probablemente drenaban superficies hoy desaparecidas por el retroceso de la pared externa y serían también relativamente antiguas.

La edad de inicio de la formación del sistema puede ser considerablemente más antigua (varias decenas de millones de años), habiendo desaparecido parte de la red por el avance de la erosión de superficie. Estos aspectos serán comentados con mayor extensión en otro artículo. Aquí sólo queremos subrayar que existe una estrecha relación entre la evolución del relieve de superficie y la morfología subterránea.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las cavernas exploradas en Roraima aportan datos para seguir avanzando en la comprensión de los mecanismos y procesos que actúan en la formación de cavernas en cuarcitas. Pero a la vez introducen nuevas preguntas.

¿A qué se debe que la red subterránea atraviese unidades que en superficie se comportan como resistentes? ¿Existe realmente

una diferencia entre unidades resistentes y no resistentes de la serie estratigráfica, o es esto un artefacto que nada explica? ¿A qué se debe que el cavernamiento se limite a un área, cuando aparentemente el mismo tipo de roca cubre grandes extensiones? ¿Qué factores controlan realmente la ubicación, génesis y trazado de las cavernas en cuarcitas?

A pesar de que han sido postulados modelos explicativos generales sobre el cavernamiento en cuarcitas y de que han sido aclarados algunos mecanismos que intervienen en la formación de cavidades, no comprendemos lo esencial de este proceso, al menos no del modo y con el grado de detalle con que es entendido para el karst clásico en calizas.

Debido a que la disolución intergranular de la cuarcita (arenización) ocurre tanto en superficie como en profundidad, cada vez parece más claro que la formación de cavernas requiere que confluyan una serie de condiciones y factores, que sólo en ocasiones se presentan juntos.

En el caso del sistema Roraima Sur intervienen los siguientes elementos:

(1) El sistema se localiza en una zona que se extiende cerca del borde externo del tepuy.

(2) El buzamiento y la pendiente topográfica tienen una débil inclinación N, es decir, no hacia el borde sino en sentido opuesto.

(3) El sistema discurre subhorizontal a poca profundidad respecto a la superficie (20-50 m) y este espesor de rocas está afectado por fracturas que alcanzan el nivel de las cuevas, facilitando la infiltración.

(4) La mayor parte de la red de galerías se desarrolla en paquetes de estratificación delgada, con intercalaciones centimétricas a milimétricas de limolitas y lutitas, interestratificadas entre cuarcitas de grano fino.

(5) Estos paquetes actúan como un nivel de debilidad litológica. Las cuarcitas a este nivel son muy friables y en la cueva se presentan en un avanzado estado de arenización, aunque en superficie este hecho no ocurre o al menos no es apreciable.

(6) La mayor parte del caudal de agua que ingresa al sistema lo hace a través bocas-sumidero, capturando el drenaje epigeo de varias depresiones de fondo plano.

(7) Estas capturas incrementan el caudal subterráneo y le confieren un régimen perenne, permitiendo un mayor tiempo de contacto roca-agua y un flujo continuado que facilita la evacuación de la sílice disuelta. La acción es comparable a la de la infiltración rápida en el karst clásico en calizas, que otorga a tales aguas una mayor capacidad de disolución en la zona profunda del acuífero.

(8) Este ingreso concentrado de las aguas a través de bocas-sumidero ocurre porque la erosión de superficie ha rebajado diferencialmente el terreno, formando una serie de depresiones de fondo plano cuyas cuencas drenan hacia el sistema.

(9) No menos importante es el hecho de que relativamente cerca existe otra zona, con fisuras verticales extensas, que permiten la evacuación del drenaje subterráneo hacia las surgencias (existencia de un nivel de base local hacia el cual pueda drenar el sistema, condición ésta muy importante desde las fases iniciales).



Marmitas de pocos decímetros de diámetro abiertas en un estrato de arenisca totalmente socavado por el agua (Foto: R. Carreño).

(10) El modelado del Roraima muestra que en los tepuys existen grandes extensiones primariamente impermeables junto a otras intensamente karstificadas, aunque en ambos casos parece estar involucrado el mismo tipo de rocas. Esto constituye una notable diferencia con el karst clásico en calizas.

Así, el dispositivo topográfico, litológico, hidrológico y estructural, presenta un conjunto de peculiaridades que, unidas todas ellas, facilitan el establecimiento de un sistema de drenaje subterráneo de gran magnitud.

Las partes hasta ahora conocidas del sistema forman una caverna ramificada, con galerías de moderado diámetro, de mayor desarrollo que otras cuevas previamente conocidas (como p.ej. Autana, Urutany y Aguapira) y distintas de las grandes simas y cavidades de trazado vertical predominantes en las cuarcitas de Venezuela y Brasil.

Un hecho significativo a señalar es que el sistema no presenta grandes bocas, por lo que no es un tipo de cavidad factible de ser

descubierta mediante reconocimiento aéreo. La mayoría de sus bocas está semi-oculta por taludes de bloques o son simas poco notables, que pasan desapercibidas entre muchas otras fracturas y zanjones en un terreno aparentemente monótono. El buzamiento en dirección opuesta al borde del tepuy, la existencia de unidades litológicamente débiles y la cercanía a un escarpe externo hacia el cual pueda drenar el sistema, son condiciones que se pueden presentar sobre grandes extensiones en muchos tepuys, por lo cual este tipo de cavidades puede ser mucho más frecuente de lo que creemos. Las características geomorfológicas que presenta el sistema pueden orientar la prospección y futura búsqueda de cavidades en otras expediciones.

La existencia de niveles litológicamente débiles, y concretamente de limolitas y lutitas, en la serie de cuarcitas de Roraima, ha sido previamente señalada para otras cuevas, como el sistema Guaiquinima o la cueva del Tigre (cerca de Santa Elena de Uairén) (SVE 1977, SZCZERBAN *et al.* 1977, URBANI 1977); intercalaciones menores de estas litologías también han sido observadas a -290 m de desnivel en la sima Aonda Sur 1 (SVE 1986); y tal vez existan otros casos en que su presencia haya pasado desapercibida a los exploradores. En Roraima Sur sólo se observan nivelitos de estas litologías en algunos puntos, no a lo largo de toda la cueva. Creemos que como son rocas fáciles de meteorizar, dejan escasos testigos. Su presencia también puede ser local e inhomogénea. No obstante somos de la opinión de que han jugado un papel de relativa importancia en la excavación de conductos. Es probable que a partir de estas discontinuidades se establezca un nivel freático donde la arenización de las cuarcitas contiguas pueda progresar, y extenderse lateralmente, hasta establecer una interconexión subterránea. Obviamente, el agua de infiltración también aprovechará las zonas estructuralmente débiles, representadas por el diaclasado y los planos de estratificación. La importancia relativa de la intercalación de otras litologías es incierta, pero es razonable postular que, dado que el residuo de la meteorización de las lutitas y limolitas deja fragmentos detríticos más finos que los granos individuales de cuarzo de las arenitas, la tubificación o formación de los primeros conductos puede producirse más fácilmente a expensas de estos niveles. Posteriormente podrá progresar exportando granos de cuarzo y formando drenes y galerías en torno a las vías de circulación del agua.

El papel que juega el diaclasado parece también interesante. Los sistemas de diaclasas tienen distintas orientaciones y a menudo los observados en fotografía aérea no coinciden con los medidos en tierra, ya que sólo las fracturas de gran extensión son observadas preferencialmente por los sensores remotos (BRICENO & SCHUBERT 1992). Los espesos paquetes de cuarcitas con estratificación cruzada presentan fracturamiento menos denso y en direcciones preferenciales distintas a los paquetes de unidades con estratificación plana, infrayacentes o suprayacentes. Esto sugiere que la anisotropía original de las rocas, genera el desarrollo de fracturamiento en distintas direcciones. En el área de las cuevas los paquetes de estratificación gruesa presentan menor densidad de fracturas, pero más abiertas. La descompresión mecánica superficial, que facilita la apertura de diaclasas, parece actuar sólo

hasta determinado nivel. En superficie esto es evidenciado por la existencia de redes de zanjones y torres que alcanzan hasta un estrato límite. En el interior de la cueva las diaclasas verticales son utilizadas por las aguas para perforar las unidades de estratificación gruesa, también hasta un nivel, siguiendo luego el drenaje a expensas de la estratificación en las cuarcitas de grano fino.

Estos hechos son llamativos: las ocho bocas de sima conocidas se han abierto a expensas de fracturas verticales, pero en su base no profundizan más allá del nivel horizontal de la cueva. Probablemente porque no tienen continuidad en el siguiente paquete, donde el diaclasado cambia de orientación. La existencia de un virtual nivel límite, sugiere a su vez que las fracturas son utilizables como vías de penetración del agua sólo en los paquetes más superficiales, donde su apertura mecánica está condicionada por la descompresión de la roca (RENAULT 1971).

Así, en el sistema de cuevas descrito, el diaclasado facilita la infiltración, pero sólo hasta un nivel en el cual la estratificación y las discontinuidades litológicas pasan a ejercer el control principal sobre el proceso de cavernamiento.

Los datos reunidos permiten resumir las siguientes conclusiones:

(1) En las cuarcitas del Grupo Roraima pueden formarse sistemas de cavernas, extensos lateralmente.

(2) Los factores litológicos pueden desempeñar un papel importante en la génesis de conductos.

(3) La arenización de la roca en profundidad, dependiente de la infiltración del agua, es condicionada por el fracturamiento y por la estratificación, y generalmente requiere la existencia de niveles que resulten más fácilmente solubles y disgregables.

(4) Esto puede ser asegurado por un suministro continuado de agua procedente de cuencas epígeas. Lo que implica una coevolución entre los procesos erosivos de superficie y la tubificación en profundidad.

(5) Las cavernas en cuarcitas, a pesar de sus peculiaridades, pueden ser más frecuente y extensas de lo que hasta ahora había sido supuesto. Existe por tanto un enorme campo abierto a futuras investigaciones.

(6) El desarrollo del karst en cuarcitas-según las evidencias reunidas- no es tan frecuente o general como el karst en calizas. Para que se forme el karst es necesario que confluyan y actúen juntos una serie de factores. Pero cuando esto ocurre, el resultado puede ser notable, como lo demuestra la existencia del sistema descrito en esta nota.

(7) La cavidad Roraima Sur, con 10.820 m de desarrollo topografiado y -72 m de desnivel, presenta un gran interés científico y ofrece un amplio campo de estudio para comprender los procesos que intervienen en la formación del karst en cuarcitas. El sistema ha sido explorado de modo preliminar y puede no haber revelado aún todos sus secretos. La posición de un área de surgencia a baja altitud es un prometedor aliciente para futuras exploraciones.

AGRADECIMIENTOS

A todos los integrantes de las expediciones de la Sociedad Venezolana de Espeleología (SVE) al tepuy Roraima, y de modo especial a Wilmer Pérez La Riva, Joaquim Astort, Francisco Blanco, María Alejandra Pérez, Marian Nieto, Sergio Campos y Osvaldo Villareal. A Pedro Vegue por su invaluable ayuda y apoyo logístico durante los traslados. A Carlos Bosque, Juan Nolla y Franz Scaramelli por hacernos llegar sus observaciones sobre otras zonas del Roraima. A Franco Urbani y Josu Maguregi por la revisión del manuscrito y sus útiles sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUERREVERE S., V.LÓPEZ, C. DELGADO & C. FREEMAN. 1939. Exploración de la Gran Sabana. *Revista de Fomento* 3(19): 501-729.
- AULER A. & E. RUBBIOLI. 2003. Le potentiel spéléologique du Brésil. *Spelunca*, FFS, 92: 18-19.
- BRICEÑO H. & C. SCHUBERT. 1985. Análisis de fracturamiento en zonas de tepuy. *Mem. VI Congr. Geol. Venezolano* 8: 5604-5621.
- BRICEÑO H. & C. SCHUBERT. 1992. Geomorfología. En O. HUBER (Ed.), *El Macizo de Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela*. O. Todtmann Editores, Caracas, pp. 61-74.
- CARREÑO R., J. NOLLA & J. ASTORT. 2002. Cavidades de Wei-Assiputepui, macizo del Roraima, Brasil. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 36: 36-45.
- COLVÉE P. 1973. Cueva en cuarcitas en el Cerro Autana, Territorio Federal Amazonas. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 4(1): 5-13.
- CVG - EDELCA. 2004. *La cuenca del río Caroní: una visión en cifras*. Gerencia de Gestión Ambiental de CVG-EDELCA, María Elena CORRALES (Ed.), Editorial Exlibris, Caracas, 244 pp.
- DUTRA G. 1997. O Maior Desnivel do Mundo em Quartzito. *O Carste*, GBPE, (edição espec.) 9: 62-69.
- GALÁN C. 1982. Notas sobre la morfología de la Cueva Autana y algunos comentarios generales sobre las formas pseudocársticas desarrolladas en cuarcitas del Grupo Roraima, Guayana Venezolana. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 10(19): 115-128.
- GALÁN C. 1983. *Sima Aonda*. Publ. SVE, Ed. Edelca, Imp. Arte, Caracas, 28 pp.
- GALÁN C. 1983. Sima Aonda, -362 m, Vénézuéla. *Spelunca*, Fed. Franc. Speol., Paris, 14(2): 14-17.
- GALÁN C. 1984. *Zonas bioclimáticas de la cuenca del río Caroní*. Publ. CVG-Edelca, Caracas. Memoria explicativa 74 pp. + 1 mapa a escala 1:500.000.
- GALÁN C. 1986. Expediciones efectuadas por la SVE al Alto Paraguaná (Sierra de Marutani), tepuy Kukenán, Auyán-tepuy Norte, Sistema Aonda, y Yuruaní tepuy. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 22: 78-85.
- GALÁN C. 1988. Cavernas y formas de superficie en rocas precámbricas del Grupo Roraima (Guayana Venezolana). *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 23: 1-12.

- GALÁN C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado. *Munibe* (Ciencias Naturales), Soc. Cienc. Aranzadi, 43: 43-72.
- GALÁN C. 1992. El clima del macizo de Chimantá. En O. HUBER (Ed.), *El Macizo de Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela*. O. Todtmann Editores, Caracas, pp. 37-52.
- GALÁN C. 1995. Exploración y estudio de cavidades en rocas silíceas precámbricas del Grupo Roraima, Guayana Venezolana: una síntesis actual. *Karaitza*, UEV, 4: 3-12.
- GALÁN C. 2000. Herpetofauna colectada en expediciones a cavidades en tepuys de la Guayana Venezolana. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 34: 11-19.
- GALÁN C. & J. LAGARDE. 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima. *Karstologia* 11-12: 49-60.
- MARTINI J. 1981. The control of karst development with reference to the formations of caves in poorly soluble rocks in the eastern Transvaal, South Africa. *Proc. 8^o Int. Congr. Speleol.*, Kentucky, USA, 1: 4-5.
- MARTINI J. 1982. Karst in Black Reef and Wolkberg Group quartzite of eastern Transvaal escarpment, South Africa. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 10(19): 99-114.
- POUYLLAU M. & M. SEURIN. 1985. Pseudo-karst dans les roches grésos-quartzitiques de la formation Roraima. *Karstologia* 5: 45-52.
- REID A. 1972. Stratigraphy of the type area of the Roraima Group, Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, *Publ. Esp.*, 6: 343-353.
- RENAULT P. 1971. *La formación de las cavernas*. Ed. Oikos-Tau, Barcelona, España, 124 pp.
- RUBBIOLI E. 2003. A nova entrada da Gruta da Bocaina e o encontro de ET no Pico do Inficionado. *O Carste*, GBPE, 15(2): 57-65.
- SCHUBERT C. 1984. Orígenes geológicos de la Gran Sabana. Paleoclimatología cuaternaria de la cuenca. En C. GALÁN (ed.), *La protección de la cuenca del río Caroní*. CVG-EDELCA, Div. Cuencas e Hidrología, Caracas, pp. 40-45.
- SCHUBERT C. & O. HUBER. 1989. *La Gran Sabana: Panorámica de una región*. Cuadernos Lagoven, Caracas, 107 pp.
- SCHUBERT C., H. BRICEÑO & P. FRITZ. 1986. Paleoenvironmental aspects of the Caroní-Paragua river basin (southeastern Venezuela). *Interciencia*, 11(6): 278-289.
- SIMÓN C., J. CASTRILLO & G. MUÑOZ. 1985. Sedimentología en zonas de Santa Elena de Uairén y Monte Roraima, Edo. Bolívar, Venezuela. *Mem. VI Congr. Geol. Venez.*, 2: 1135-1163.
- SVE - SOCIEDAD VENEZOLANA DE ESPELEOLOGÍA. 1976. Am.11 - Cueva del Cerro Autana. Bo.1-3 - Simas de Sarisariñama. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 7(13): 81-100.
- SVE - SOCIEDAD VENEZOLANA DE ESPELEOLOGÍA. 1977. Bo.4-5 - Cuevas Urutany 1 y 2. Bo.6 - Cueva El Tigre. Bo.7 - Cueva El Abismo. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 8(16): 199-210.
- SVE - SOCIEDAD VENEZOLANA DE ESPELEOLOGÍA. 1986. Bo.9-19 - Cuevas de Aguapira 1 a 11. Bo.20-21 - Cuevas de Quebrada Arapán y Sistema Taamó-Poipotá. Bo.22-25 - Simas Kukenán 1 a 4. Bo.26 - Sima Auyán-tepuy Norte. Bo.27-30 - Simas del sistema Aonda. Bo.31-32. Simas Yuruaní tepuy 1 y 2. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 22: 49-75.
- SZCZERBAN E., F. URBANI & P. COLVÉE. 1977. Cuevas y simas en cuarcitas y metalimolitas del Grupo Roraima, meseta de Guaiquinima, Edo. Bolívar. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 8(16): 127-154.
- URBANI F. 1977. Novedades sobre estudios realizados en las formas cársicas y pseudocársicas del Escudo de Guayana. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 8(16): 175-197.
- URBANI F. 1981. Karst development in siliceous rocks, Venezuelan Guiana Shield. *Proc. 8th Inter. Congr. Speleol.* 2: 548.
- URBANI F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. *Interciencia* 11(6): 298-300.
- URBANI F. & C. GALÁN. 1987. Listado de cavidades venezolanas en rocas no-carbonáticas. *Bol. Geociencias*, Universidad Central de Venezuela, Dpto. Geol., Caracas, 8: 5-12.
- URBANI F., P. ZAWIDZKI & B. KOISAR. 1976. Observaciones geológicas en la meseta de Sarisariñama, Estado Bolívar. *Bol. Inf. Asoc. Venezol. Geol. Min. Petrol.* 19(2): 77-86.
- URBANI F., S. TALUKDAR, E. SZCZERBAN, & P. COLVEE. 1977. Metamorfismo en rocas del Grupo Roraima, Estado Bolívar y Territorio Federal Amazonas. *Mem. V Congr. Geol. Venez.* 2: 623-642.
- YÁNEZ G. 1985. Geología y geomorfología del Grupo Roraima en el Sureste de Venezuela. *Mem. VI Congr. Geol. Venez.* 2: 1243-1306.

