



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Manuscrito recibido: Mayo 30, 2024

Revisión recibida: Noviembre 30, 2024

Aceptado: Diciembre 2, 2024

## Geoquímica y espeleogénesis de cuevas de cuarzoarenita en la serranía de Chiribiquete, sector de los ríos Caquetá y Yará, Colombia

Geochemistry and speleogenesis of quartz arenite caves in the Serranía de Chiribiquete, sector of the Caquetá and Yará rivers, Colombia

Francesco Sauro<sup>1,2</sup>✉, Carlos A. Lasso<sup>3,4</sup>✉

<sup>1</sup> La Venta Explorazioni Geografiche APS, Treviso, Italia.

<sup>2</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università degli studi di Padova, Italia

<sup>3</sup> Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia.

<sup>4</sup> Asociación Espeleológica Colombiana (Espeleocol), Bogotá, Colombia.

### Resumen

El área objetivo de esta investigación fue el territorio del Resguardo Indígena Monochoa, al sur de los límites del Parque Nacional Chiribiquete, una zona del macizo de cuarzoarenitas (Formación Araracuara), atravesada por los ríos Caquetá y Yará, Amazonia (Colombia). La primera expedición (febrero de 2022) estudió la Cueva de Los Guácharos, una resurgencia que se abre en la margen izquierda del cañón del río Caquetá (Araracuara). En febrero de 2023, una expedición científica formada por indígenas Uitoto y Andoque y espeleólogos colombianos, italianos y franceses remontó el río Yará hasta los rápidos de Gamitana, llegando a los tepuyes del Yará. Se hizo la exploración y topografía de dos grandes cuevas horizontales. La primera resultó ser un gran túnel de unos 600 m de longitud total. La segunda corresponde a la base de una gran sima, que da acceso a un túnel horizontal activo; se levantó la topografía a lo largo de unos 400 metros hacia el exterior de la resurgencia en la base de la montaña, tras una distancia de casi un kilómetro. Además de las exploraciones, se llevaron a cabo varias investigaciones científicas sobre la hidroquímica, biospeleología y geología de la zona, petrografía de las cuarzoarenita y los extraordinarios espeleotemas de ópalo, similares a los ya descubiertos en Venezuela. Los datos preliminares muestran que la espeleogénesis se produce por procesos de disolución intergranular del cuarzo, que conducen a la “arenización” y posterior erosión acelerada de capas específicas. La presencia de una capa de “*Banded Iron Formation*” favorece la formación de cuevas en un intervalo estratigráfico específico.

**Palabras clave:** espeleogénesis, cuarzo, hidroquímica, arenización, espeleotemas, Formaciones de Hierro Bandeado (BIF).

### Abstract

The area objective of this research was the Resguardo Indígena Monochoa, south of the Chiribiquete National Park, a quartz arenite massif (Araracuara Formation) crossed by the Caquetá and Yará rivers. The first expedition (February 2022) studied Cueva de Los Guácharos, a resurgence that opens at the bottom of the Araracuara canyon along the Caquetá river. In February 2023, a scientific expedition formed by Uitoto and Andoque indigenous people and Colombian and Italian speleologists, went up the Yará river to the Gamitana rapids, reaching the Yará tepuyes. Two large horizontal caves were explored and surveyed. The first was a large tunnel of about 600 m in total length, the second was reached at the base of a large chasm, giving access to an active horizontal tunnel, which was surveyed for about 400 m outwards from the resurgence at the base of the mountain, after a distance of almost 1 km. In addition to exploration, several scientific investigations are being carried out on hydrochemistry, biospeleology, geology of the area, petrography of the quartz arenites and on the extraordinary opal speleothems (similar to those already discovered in Venezuela). Preliminary data show that speleogenesis is produced by intergranular quartz dissolution, leading to ‘arenization’ and subsequent accelerated erosion of specific layers. The presence of a Banded Iron Formation layer favours the formation of caves in a specific stratigraphic interval.

**Keywords:** Speleogenesis, caves, quartz, hydrochemistry, arenization, speleothems, Banded Iron Formation (BIF)

**Citación:** Sauro, F., Lasso, C.A. (2024). Geoquímica y espeleogénesis de cuevas de cuarzoarenita en la Serranía de Chiribiquete, entre los ríos Caquetá y Yará, Colombia. Boletín Geológico, 51(2), Número especial de Espeleología. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.51.2.2024.743>

## 1. INTRODUCCIÓN

El cuarzo es uno de los minerales menos solubles de la superficie terrestre. No obstante, las litologías dominadas por el cuarzo presentan formas geomorfológicas y cuevas muy peculiares que se han asociado a terrenos kársticos. Esta paradoja se viene investigando desde hace más de cincuenta años, y varios investigadores han demostrado que el comportamiento químico de la sílice con el agua (solubilidad, velocidad de disolución) y los caracteres petrográficos de estas rocas concurren en la desagregación mediante el proceso de "arenización" (Martini 1979). Desde los años sesenta, Sudamérica ha sido el lugar inequívoco y principal para el avance de nuestra comprensión del karst en rocas de cuarzo en términos de proceso y morfología (White et al. 1966; Urbani and Szczerban, 1974, Urbani 1986). En las últimas dos décadas, tanto en Venezuela como en Brasil, se han realizado importantes descubrimientos en relación con complejos sistemas de cuevas y simas (Aubrecht et al. 2012; Sauro 2014), y Venezuela alberga lo que sin duda es el karst de cuarzoarenita mejor desarrollado del mundo (Wray & Sauro, 2017).

Hasta la fecha, se han explorado más de 150 cuevas entre los estados Bolívar y Amazonas en Venezuela, y Roraima en Brasil, pero aún se esconde un gran potencial de descubrimiento y exploración de cuevas en las zonas del escudo precámbrico pertenecientes a Suriname y Guyana al este, y Colombia, al oeste (Santos et al., 2003). En este último caso el potencial espeleológico sigue siendo muy elevado, ya que existen varios macizos constituidos por cuarzo arenita, como la Sierra de Naquén en la frontera con Brasil, las serranías en la zona del Río Inírida, la Serranía de la Macarena y en fin el extenso macizo de la Serranía de Chiribiquete, que aún esperan ser objeto de investigaciones espeleológicas adecuada (Vergara, 1994).

Desde 2020 la Asociación La Venta y el Instituto Humboldt iniciaron un proyecto de exploración espeleológica en el sur de la Serranía de Chiribiquete, situada en los departamentos de Guaviare y Caquetá. En concreto, la investigación se centra en el territorio del Resguardo Indígena Uitoto de Monochoa, más al sur de los límites del Parque Nacional Chiribiquete, una zona de montañas de arenisca cuarzosa atravesada por los ríos Caquetá y Yari. El objetivo de las dos primeras expediciones científica (febrero 2022 y febrero 2023), fue explorar y estudiar la geomorfología, las cuevas y el entorno geológico.

A través de consultas con la comunidad Uitoto de Monochoa, el proyecto ha evolucionado más allá de los fines de exploración e investigación. Desde las reuniones iniciales, se decidió que la expedición para buscar cuevas en las montañas del Yari sería un esfuerzo conjunto entre la comunidad indígena local y el equipo

nacional e internacional, compartiendo todos los datos y experiencias para que los indígenas pudieran contar con más información sobre su territorio ancestral. El conocimiento de esta región y de su singularidad natural es una herramienta fundamental para el futuro desarrollo de planes de gestión y protección dentro de la reserva indígena.

En 2022 el equipo investigó una cueva en el Cañón de Araracuara, mientras que en el 2023 los esfuerzos se focalizaron en el área de las montañas del Yari donde se descubrió y exploró un sistema de dos grandes cuevas horizontales. Se realizaron varios análisis químicos del agua y se recogieron muestras de rocas por análisis en laboratorio. Además, las expediciones dedicaron muchos esfuerzos al estudio bioespeleológico de los ecosistemas subterráneos, que no se han incluido en esta publicación.

Este artículo describe los resultados en el marco de estudios recientes sobre meteorización, geoquímica y espeleogénesis en areniscas cuarzosas, lo que permite confirmar la presencia de cuevas en la Formación Araracuara (cuarzoarenitas cuya edad es considerada del Ordovícico) en el sector de la Serranía del Chiribiquete y avanzar en las primeras hipótesis espeleogenéticas. No se incluyen en esto artículo, los estudios biológicos y ecológicos que serán parte de publicaciones futuras.

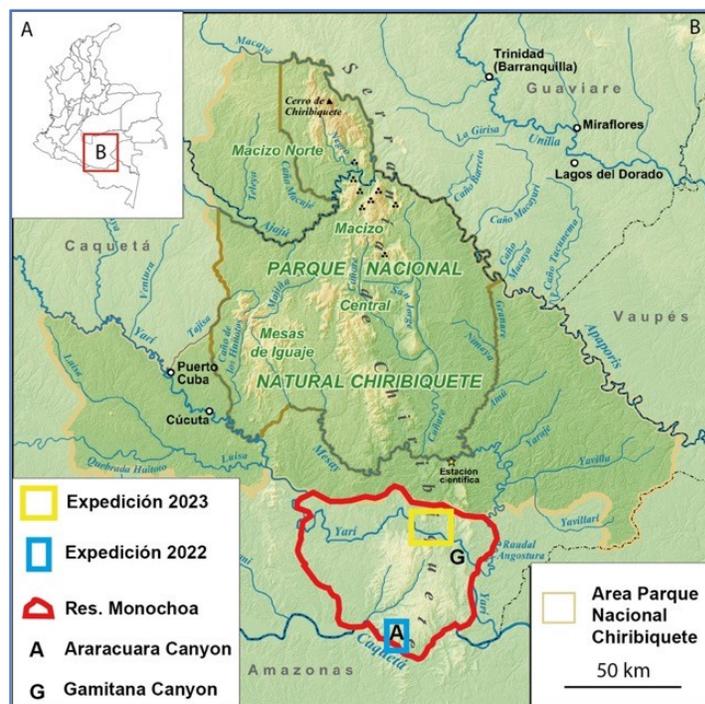


Fig. 1. Localización: A) Área de estudio en el Departamento de Caquetá, Colombia B) Localización del Resguardo Monochoa entre el Parque Nacional de Chiribiquete y el río Caquetá con la localización de los viajes de exploración.

## 2. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

### 2.1 Área geográfica

La zona explorada está situada en el departamento de Caquetá. Desde el punto de vista geográfico, esta región pertenece a la prolongación meridional del macizo de Chiribiquete. Este macizo de arenisca cuarzosa se considera el extremo más occidental del Escudo Guayanés, con típicas montañas de mesa "tepuy" rodeadas de acantilados abruptos. La cadena montañosa alcanza alturas de hasta 1.000 m s.n.m. y se desarrolla a lo largo de unos 280 km de norte a sur. El sector septentrional y central de la cadena montañosa está protegido dentro del Parque Nacional de Chiribiquete, que representa la mayor zona protegida de la Amazonia colombiana. El sector sur, en cambio, está dentro de la Reserva Monochoa y es administrado por los indígenas de la comunidad Uitoto de Monochoa. Los principales ríos que atraviesan la cordillera de Chiribiquete de oeste a este para llegar a la llanura amazónica son el Ajajú-Apaporis, Mesay, Yarí y Caquetá. Cuando se encuentran con las colinas de arenisca cuarzosa, se ven obligados a entrar en pasajes estrechos, como el cañón de Araracuara en el río Caquetá o los rápidos de Gamitana en el río Yarí (Fig. 1).

Los sistemas de cuevas se forman principalmente en el paso morfológico e hidrológico entre el tepuy y el encajamiento profundo de esos ríos. El área de exploración se ha centrado principalmente en el cañón de Araracuara a lo largo del Caquetá (expedición de febrero de 2022) y de la garganta de Gamitana a lo largo del Yarí y tepuyes alrededor (expedición de febrero de 2023).

Aparte de la cueva de Guácharos en el cañón de Araracuara, que es bien conocida por los indígenas, se han identificado todas las demás entradas de cuevas en la zona del río Yarí con ayuda de imágenes de satélite y reconocimientos aéreos.

### 2.2 Caracterización geológica

La historia geológica de la Serranía de Chiribiquete comienza entre 2000 y 1800 millones de años atrás, en el Paleoproterozoico, cuando se formaron las primeras rocas en Colombia asociadas al margen occidental del Escudo Guayanés (Ibáñez-Mejía et al., 2011).

El Escudo Guayanés en la región del Caquetá colombiano está caracterizado en su base por el Complejo Migmatítico Mitú, formado por gneises migmatíticos, gneises graníticos y granitoides, localmente asociados con algunos esquistos micáceos, cuarcitas y anfíbolitas. Estas rocas constituyen el basamento geológico de las rocas cristalinas precámbricas de la Amazonia colombiana. Posteriormente, en el Escudo Guayanés, se produjo un proceso de erosión de las rocas cristalinas y sedimentación detrítica

marcado por una discordancia entre el Precámbrico y el Ordovícico Paleozoico Temprano con el registro de un conglomerado basal. La deposición sedimentaria en la Serranía de Chiribiquete está relacionada con las rocas de la Formación Araracuara, constituida principalmente por secuencias de areniscas con algunos conglomerados y niveles de areniscas. La cuarzoarenita es la litología donde se desarrollaron todas las cuevas exploradas. Hay que señalar que, en comparación con otras secuencias cuarzo-sedimentarias depositadas sobre el Escudo Guayanés, la Formación Araracuara se considera mucho más joven en edad, posiblemente formada durante el Ordovícico (Arenigiano), alrededor de 477 a 470 millones de años atrás (Galvis et al., 1979). El Supergrupo Roraima, entre Venezuela y Brasil, a pesar de tener una composición y petrografía muy similares, está en cambio bien datado para la edad Precámbrica, entre 1,9 y 1,6 mil millones de años atrás (Santos et al., 2003).

La atribución al Ordovícico de la formación Araracuara se basa en unas pocas evidencias icnofósiles descritas para algunas areniscas ricas en arcilla en el fondo del Cañón de Araracuara (Mojica y Villarroel, 1990). Sin embargo, estas evidencias fósiles son escasas y la atribución de edad debe tomarse con cautela. Se han realizado muy pocos estudios geológicos sobre Chiribiquete y la similitud con otras areniscas cuarzosas precámbricas del Escudo de Guayana, lo que sugiere que podrían proponerse correlaciones de edad más precisas.

Las razones de las opiniones contradictorias sobre la edad y la correlación de las unidades sedimentarias se deben a que estas rocas se extienden por cinco países y afloran sobre todo en zonas remotas cubiertas por la selva, donde el acceso es difícil. Las paredes de las cuevas podrían proporcionar secuencias estratigráficas ideales expuestas para el muestreo y la caracterización.

A finales del Paleozoico, un fallamiento de tipo "horst", permitió la exhumación de la secuencia precámbrica y paleozoica en la Serranía de Chiribiquete. La zona estuvo expuesta a la erosión al menos desde el Jurásico, lo que permitió la formación de una morfología de mesas disectadas como en la región de los tepuyes venezolanos del Escudo de Guayana.

## 3. MÉTODO

Las investigaciones de campo se llevaron a cabo en dos expediciones a lo largo de la temporada seca (marzo 2022, febrero 2023), incluyendo: i) exploración y topografía de cuevas, estudios geológicos y geomorfológicos superficiales y subterráneos; ii) análisis de agua in situ con instrumentos portátiles y un kit de pruebas colorimétricas de campo; iii) muestreo de rocas para análisis geoquímicos y petrológicos de laboratorio.

### 3.1 Exploración y topografía de cuevas

Las entradas a las cuevas se identificaron mediante el análisis de imágenes por satélite (plataformas Google Maps y Bing Map) y sobrevuelos aéreos posteriores, con la única excepción de la Cueva de Los Guácharos que ya era bien conocida por la comunidad indígena local. La topografía de las cuevas se obtuvo midiendo una línea poligonal entre estaciones mediante un distanciómetro láser Leica Disto D8 acoplado con el instrumento Cavesniper (Megaplot SJ; Polok et al., 2012), un dispositivo portátil y ligero equipado con una brújula electrónica integrada con un clinómetro digital, cuyas lecturas se calculan con un procesador ARM7TDMI. Estos instrumentos permitieron medir rápidamente la distancia, el acimut y la inclinación entre las estaciones con un alto grado de precisión (exactitud respectivamente 1 mm y 1°).

El uso de esta instrumentación ligera y compacta proporcionó una medición de alta precisión de la posición de cada estación sin necesidad de utilizar pesados instrumentos de estación total o GPS, que son respectivamente de difícil transporte y carecen de señales de satélite en el complejo entorno subterráneo. Utilizando el dispositivo Cavesniper también fue posible medir los “splay shots” (medidas de la distancia y dirección entre la estación y los entornos subterráneos como paredes, techo, piso, y elementos de relevancia morfológica) lo que permitió una referencia de respaldo de alta precisión para el dibujo del plan topográfico (Sauro et al., 2013).

### 3.2 Análisis hidroquímicos

Se realizaron diez análisis de agua in situ en diferentes localizaciones superficiales (ríos) y dos cuevas. El objetivo fue caracterizar tanto las aguas superficiales como las subterráneas, siguiendo el mismo enfoque analítico y de clasificación de Mecchia et al. (2014). Los datos obtenidos representan el conjunto de análisis de agua más completo del macizo de Yará hasta la fecha

Se realizaron 5 análisis de agua in situ en dos cuevas (Tabla 1). Se tomó una muestra de agua en el río Caquetá, cerca del pueblo de Araracuara, una muestra en el río Yará, una en el río Mesay y dos en arroyos o quebradas en la base del tepuy. Las mediciones in situ se realizaron con instrumentos portátiles (Hanna Instruments), calibrados in situ, para determinar la conductividad eléctrica del agua (EC, resolución de 0,1  $\square$ S cm<sup>-1</sup>, precisión  $\pm 1\%$ ), el pH (resolución 0,01, precisión  $\pm 0,05$ ) y la temperatura (resolución 0,1 °C, precisión  $\pm 0,5$  °C).

Seis muestras de agua también se analizaron utilizando un kit de ensayo colorimétrico de campo (Aquaquant 14410 Silicon - Merck), para cuantificar la concentración de sílice disuelta en el intervalo 0,01-0,25 mg L<sup>-1</sup> (como SiO<sub>2</sub>), con un error estimado inferior al 20%. Las muestras con concentraciones de sílice superiores a 0,25 mg L<sup>-1</sup> se diluyeron con agua destilada y se analizaron de nuevo para ajustarlas al rango del kit. Los análisis de

campo se realizaron utilizando el mismo kit de ensayo de SiO<sub>2</sub> y los mismos procedimientos utilizados por Mecchia et al., (2014). Los resultados analíticos se han comparado con análisis previos disponibles en la literatura relativos a aguas superficiales y subterráneas recogidas en los tepuyes Chimantá, Roraima, Auyán (Mecchia, et al., 2014) y Sarisariñama (Sauro et al., 2019).

### 3.3 Análisis petrográficos

La composición de las muestras de roca fue analizada con observaciones en lamina delgadas al microscopio óptico polarizado en la Universidad de Padova, Italia.

Por la identificación de los minerales las muestras fueron analizados por el equipo MicroRamanSpectra (Padua) utilizando un aparato de análisis Raman XploraPlus© con un láser de 532 nm de Horiba Ltd. (Italia). El conjunto de datos Raman se comparó con los espectros de las bases de datos y la bibliografía utilizando el software Crystal Sleuth©, desarrollado durante el Proyecto RRUFF TM del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona (Lafuente et al., 2015).

Las imágenes de microscopía electrónica secundaria fueron utilizadas para identificar las características de la hidrólisis de soluciones y arcillas en muestras de arenisca cuarzosa. Las submuestras se cubrieron primero con una fina capa de oro evaporado por pulverización catódica y, a continuación, se introdujeron en un microscopio electrónico Thermofisher ESEM FEG QUATRO S, que funcionaba en el departamento BIGEA de la Universidad de Bologna. El ESEM estaba equipado con un espectrómetro de rayos X de energía dispersiva (EDS) EDAX, que se utilizó para las mediciones espectro-métricas de los elementos principales.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Cuevas exploradas

Se cartografiaron tres cuevas principales en la región de la reserva indígena de Monochoa. La Cueva de Los Guácharos (Fig. 2) está situada en el margen izquierdo del río Caquetá en Araracuara, mientras que los dos principales sistemas de cuevas, Ononeñagoda y Necaeridagoda están situados en la meseta de tepuyes al norte del río Yará (Fig. 3, 4, 5), entre los rápidos de El Danto y La Gamitana. Al menos otras dos cuevas importantes sin nombre han sido identificadas durante las expediciones, pero sólo han sido exploradas y documentadas parcialmente.

**Cueva de Los Guácharos.** Esta cueva es conocida por las comunidades indígenas Uitoto y Andoque. Se abre en el fondo -del río Caquetá en Araracuara, un espectacular cañón con paredes de cuarzo arenita de hasta 70 m de altura (coordenadas WGS84 72.4080734 este, 0.5985541 sur). La cueva es una resurgencia activa, que probablemente drena un arroyo activo perteneciente a la meseta, en la zona de la pista de aterrizaje de Araracuara. La entrada está situada a unos 25 m por encima del fondo del cañón.

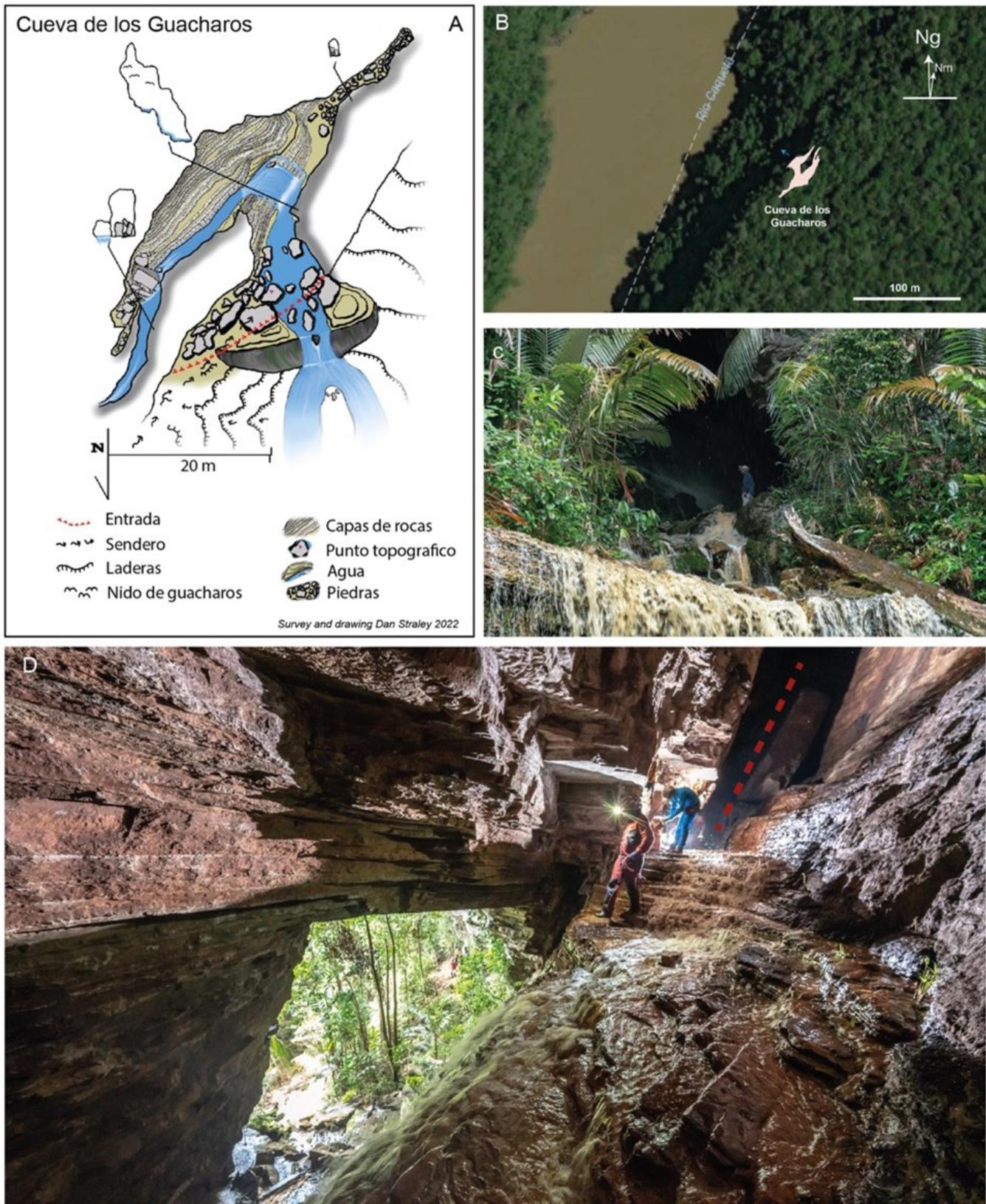


Fig. 2. La cueva de Los Guácharos se abre en el fondo de la garganta del río Caquetá en Araracuara. Es evidente el control espeleogénético por una fractura (línea roja) casi vertical agrandada por la erosión del agua. Topografía: Daniel Straley. Fotografía: Alessio Romeo/La Venta)

El agua sale por un portal de 15 m de altura y 10 m de ancho, seguido de una serie de dos cascadas que se unen al río Caquetá. La galería de entrada da acceso a una cámara, cuya pared izquierda está ocupada por otra cascada de 10 m de altura que brota de una fractura alargada paralela a las paredes del cañón de Araracuara (Fig. 2). Trepano por encima de la cascada es posible acceder a una cámara suspendida con algunas decenas de guacharos (*Steatornis caripensis*) y varios nidos. Siguiendo el agua y trepano por una serie de grandes bloques encajados en la fractura ampliada, es posible llegar a una galería más alta.

El arroyo puede seguirse por menos de 10 m hasta que un derrumbe no permite avanzar más. Los indígenas afirman que hace pocas décadas era posible continuar a través de los bloques hasta salir por un punto de hundimiento en la zona de la pista de aterrizaje. La cueva es muy importante por los diversos relatos mitológicos asociados al cañón de Araracuara, que difieren ligeramente entre la tradición Uitoto y la Andoque. La longitud total de la cueva es de aproximadamente 150 m con un desarrollo vertical de 35 m.

**Ononeñagoda.** Se trata de un sistema de drenaje subterráneo caracterizado por una profunda abertura en forma de "sima" en la meseta del tepuy, a 3 km al norte del río Yarí (coordenadas WGS84: 72.5353942 este, 0.1830645 sur, ). La sima tiene forma redondeada con un diámetro aproximado de 110 m y una profundidad de 45 m (Fig. 3)

El fondo de la sima está ocupado por un denso bosque con árboles que alcanzan más de 30 m de altura. Se llegó a la cueva por primera vez en mayo de 2022 durante la exploración preliminar realizada por el equipo indígena y se exploró por completo en febrero de 2023.

En esta ocasión la cueva fue llamada Ononeñagoda, que significa "Cueva de los Misterios" en lengua indígena Uitoto. Varias pequeñas cavidades con pilares (Sauro 2014) y salientes se abren a lo largo de las paredes del fondo de la sima. Al llegar al punto más profundo de la sima a 52 m de la superficie, es posible entrar a través de un derrumbe de rocas hasta llegar al arroyo subterráneo.

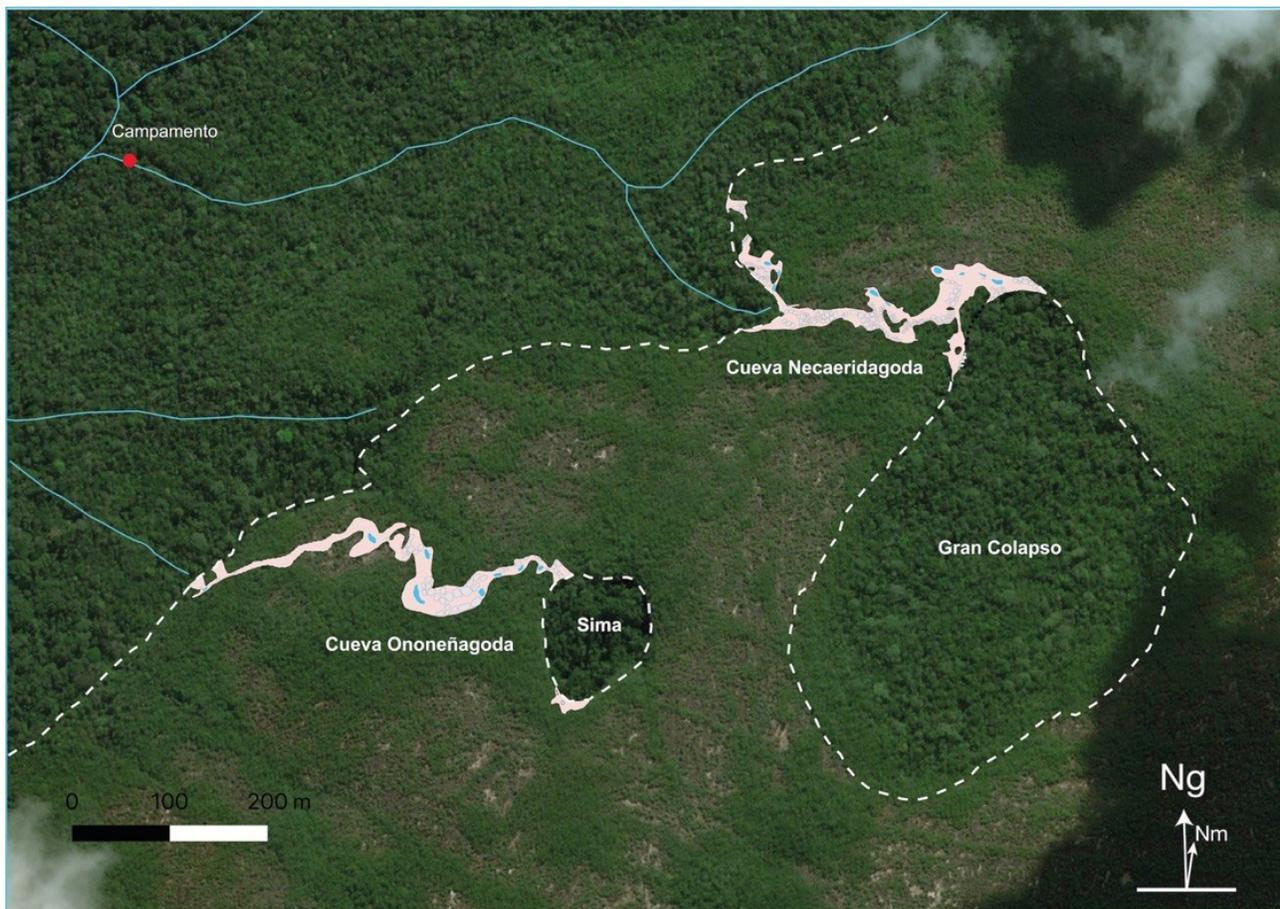


Fig. 3 Superposición de las topografías de Ononeñagoda y Necaeridagoda en una imagen de satélite (fuente: Bing Map)

Tras unos metros, la cueva se abre en una amplia galería caracterizada por pequeños lagos y espeleotemas de sílice. La galería continúa con una serie de suelos arenosos o zonas de bloques, ampliándose hasta un ancho recodo del río, donde la anchura máxima supera los 30 m, pero con el techo no más alto de 2-3 m. El túnel está claramente controlado por los estratos de arenisca cuarzosa, ligeramente inclinados hacia el oeste.

Tras la curva del río, la galería está parcialmente obstruida por algunos derrumbes masivos del techo. Grandes losas de cuarzo arenita han caído al suelo y es necesario arrastrarse por algunas decenas de metros a través de estrechos pasadizos. Aquí es posible observar los interestratos (“*interstrata*”) que controlan el desarrollo de la cueva, y conforman una capa de óxido-hidróxidos de hierro de 10 a 20 cm de espesor, similar a las Formaciones de Hierro en Bandas (BIF) típicas del Precámbrico.

Después de los pasadizos estrechos, la cueva se abre de nuevo en una galería de piso arenosa donde el arroyo es visible

de nuevo. Después de este pasaje hay un nuevo estrechamiento de bloques desprendidos del techo que reduce la sección transversal de la cueva y continúa con un pasaje muy bajo entre el techo y los estratos caídos (punto J en Fig. 4). Este pasaje es de aproximadamente 150 m de largo, pero no fue estudiado debido a su estrechez.

Después de los estrechamientos, la cueva se abre de nuevo en un pasaje más ancho hasta llegar a dos grandes entradas en los acantilados inferiores del tepuy. El agua sigue su camino a lo largo de las paredes y a través de montones de bloques, probablemente resurgiendo unas decenas de metros por debajo de los acantilados. La longitud total de la cueva es de 640 m (460 m cartografiados + 180 m sólo estimados, Fig. 4), lo que la convierte en la cueva de cuarzoarenita más larga de Colombia explorada hasta hoy.

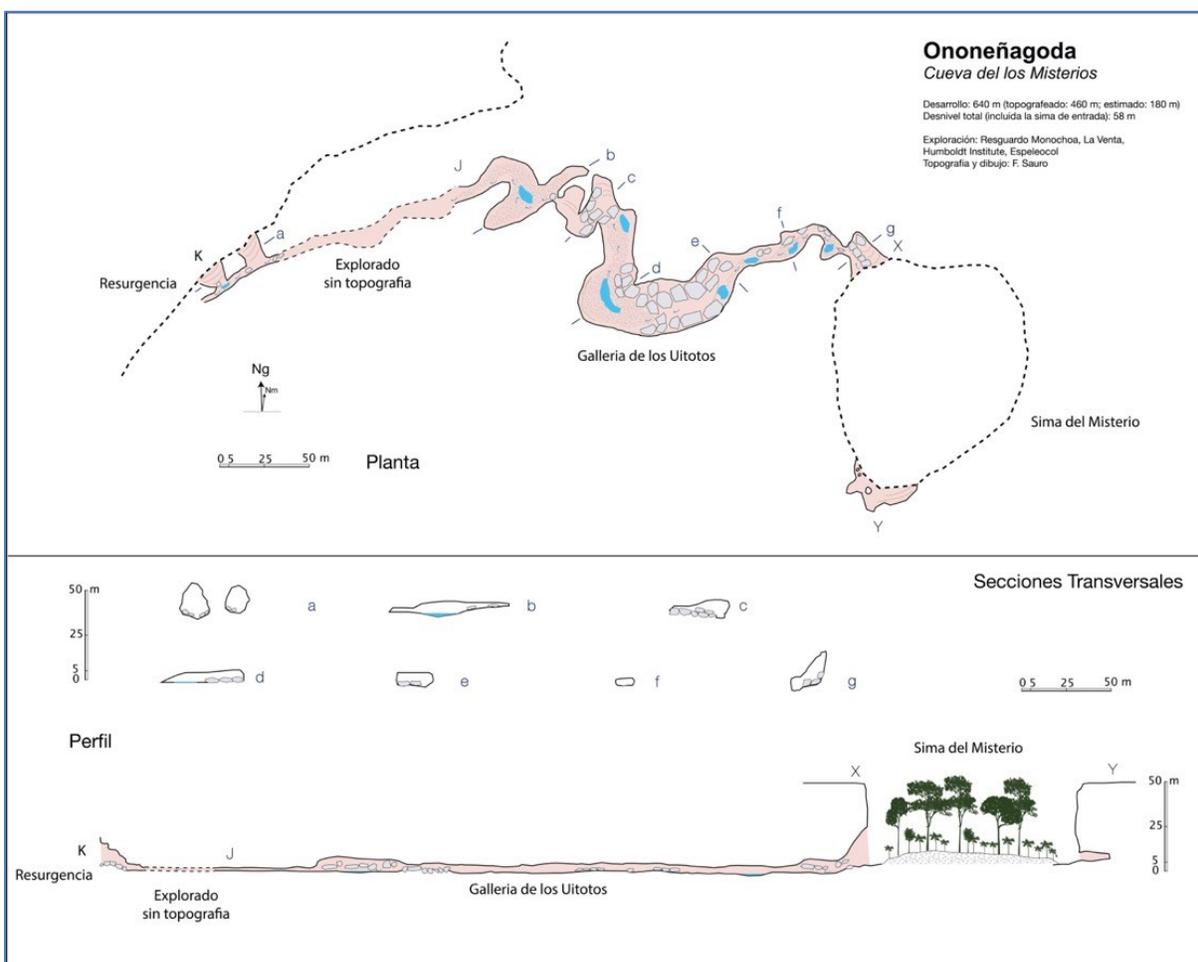


Fig. 4 Mapa de la cueva de Ononeñagoda.

**Necaeridagoda.** Se trata de la cueva más voluminosa y es-cénica explorada hasta ahora en la Reserva de Monochoa y en el macizo de Chiribiquete. Se abre como un portal gigante al fondo de los acantilados de la misma meseta de tepuyes de Ononeña-goda (3,4 km al norte del río Yari; coordenadas WGS84 72.5341614 este, 0.1802357 sur). Es la resurgencia de otro sis-tema de drenaje cuya cuenca hidrográfica pertenece a una depre-sión de colapso muy amplia y larga que se abre en el centro de la meseta. La entrada inferior de la resurgencia alcanza más de 30 m de altura y 35 m de anchura, con una serie de galerías laterales y salientes que muestran un proceso erosivo de socavación muy

relevante a lo largo de la parte inferior de los acantilados del tepuy (Fig. 5). El agua emerge por debajo de una gran pila de blo-ques.

Trepando por encima de los bloques es posible acceder a una gran galería fósil con el suelo ocupado por gigantescas losas de cuarcita desprendidas del techo. La galería continúa con im-portantes dimensiones hasta llegar a una bifurcación. A la dere-cha es posible continuar por el mismo nivel de galerías alcan-zando una cámara caracterizada por una colonia de murciélagos e importantes acumulaciones de guano (Salón del Guano en la topografía, Fig. 5).

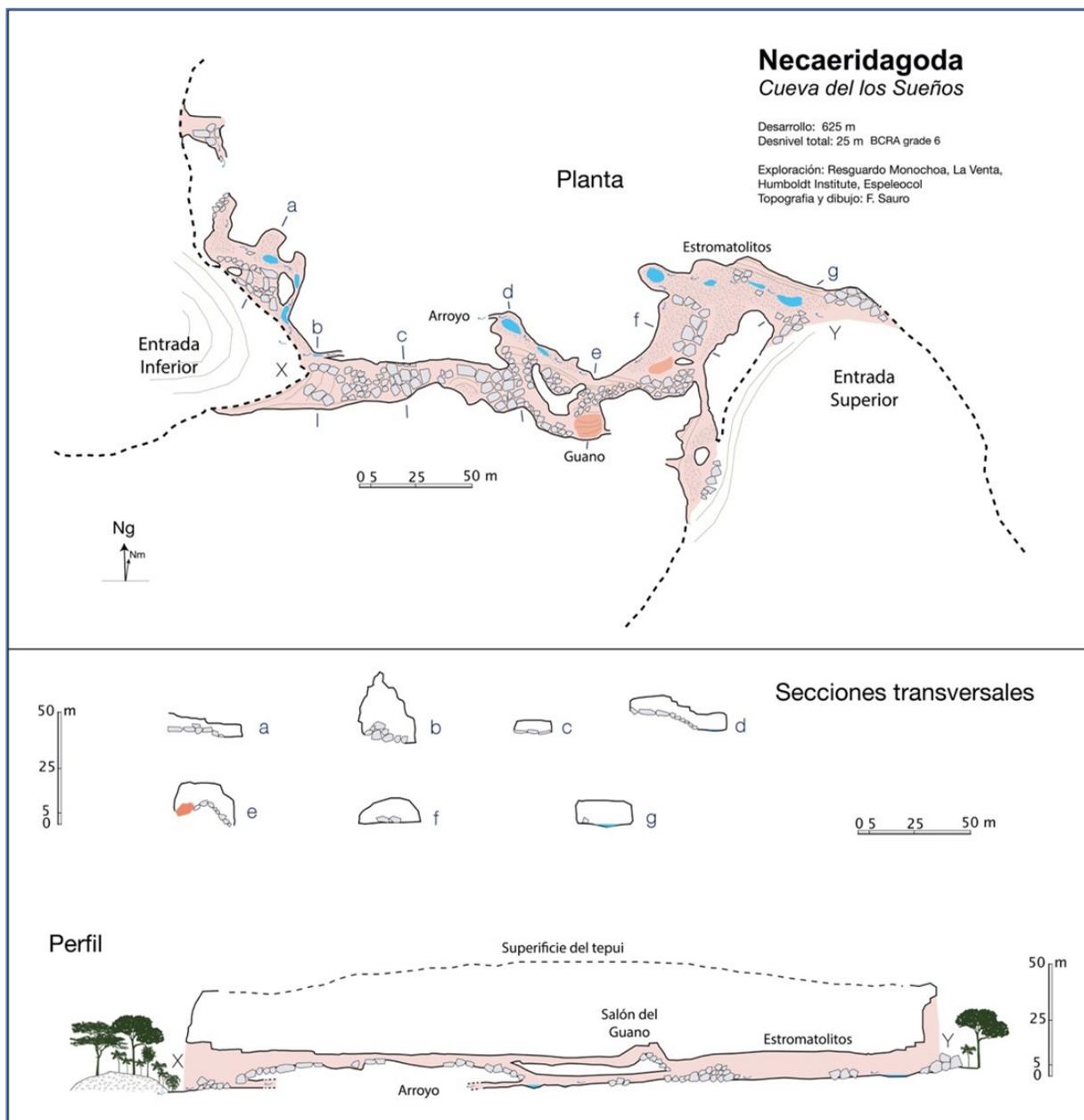


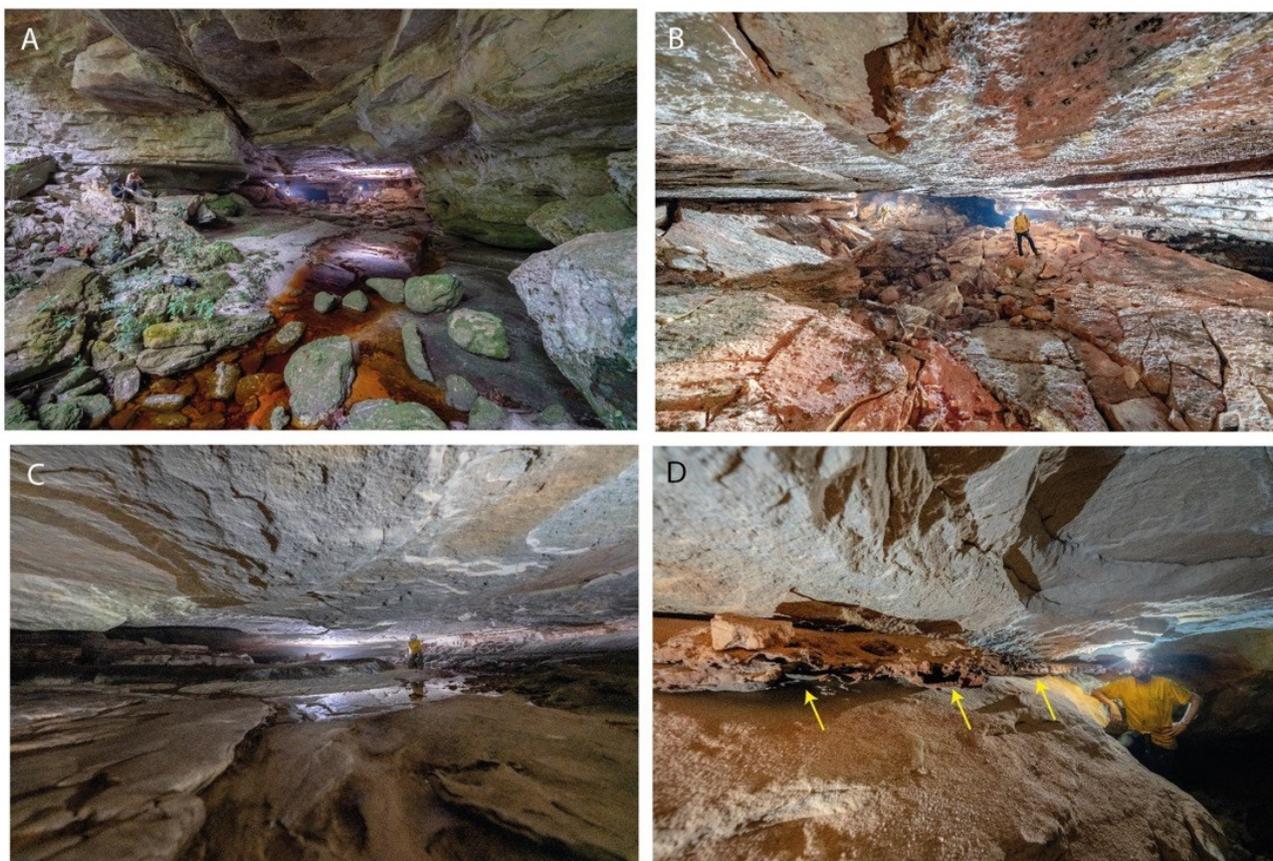
Fig. 5 Mapa de las cuevas de Necaeridagoda.

En el lado izquierdo de la cámara hay un pasaje inclinado que conecta con el nivel activo inferior de la cueva. Desde la bifurcación, en la rama izquierda es posible descender hasta el gran conducto del arroyo activo, con playas arenosas y pequeños lagos. Aguas arriba, tras la bifurcación en la que se unen los dos ramales, la galería se abre en una amplia y alta cámara, que alcanza más de 30 m de anchura y más de 60 m de longitud. Las paredes se caracterizan por bancos erosivos y curvas profundas inferiores donde la corriente activa está erosionando nuevos pasajes en la cuarcita arenizada.

La cámara gira hacia la derecha abriéndose en un gran portal con algunos pequeños lagos en el suelo (Fig. 6 A). El portal desemboca en la amplia depresión del derrumbe en la cima de la

meseta del tepuy. Siguiendo las paredes del derrumbe, es posible encontrar varios salientes y galerías secundarias que se ramifican entre pilares erosivos y pilas de bloques. Además, en esta zona es muy evidente el efecto de la socavación de las paredes del derrumbe y de la cueva.

Toda la cueva se desarrolla a lo largo de pocos planos de estratificación claros, probablemente los mismos que controlan el desarrollo de Ononeñagoda. Los hidróxidos de hierro son visibles a lo largo de los estratos, aunque en esta zona no se ha identificado un lecho claro de Bandas de Hierro (BIF). La cueva está alcanzada en depósitos minerales secundarios, incluyendo estromatolitos de sílice a lo largo de las paredes y en los suelos.



**Fig. 6** Morfologías típicas de las cuevas del Yari tepuy: A) la entrada superior de Necaeridagoda, claramente controlada por la interacción entre un lecho específico de arenisca cuarzosa y una fractura oblicua. B) Galería típica en Necaeridagoda caracterizada por el colapso de estratos de arenisca cuarzosa. C) Paso muy ancho, pero bajo en Ononeñagoda, controlado por arenización y erosión a lo largo de un estrato específico de hidróxido de hierro. D) La capa de hidróxido de hierro (similar a una Formación de Hierro en Bandas), caracteriza todas las galerías de Ononeñagoda actuando probablemente como horizonte de inicio para la espeleogénesis (flechas amarillas). Fotografías Alessio Romeo/La Venta.

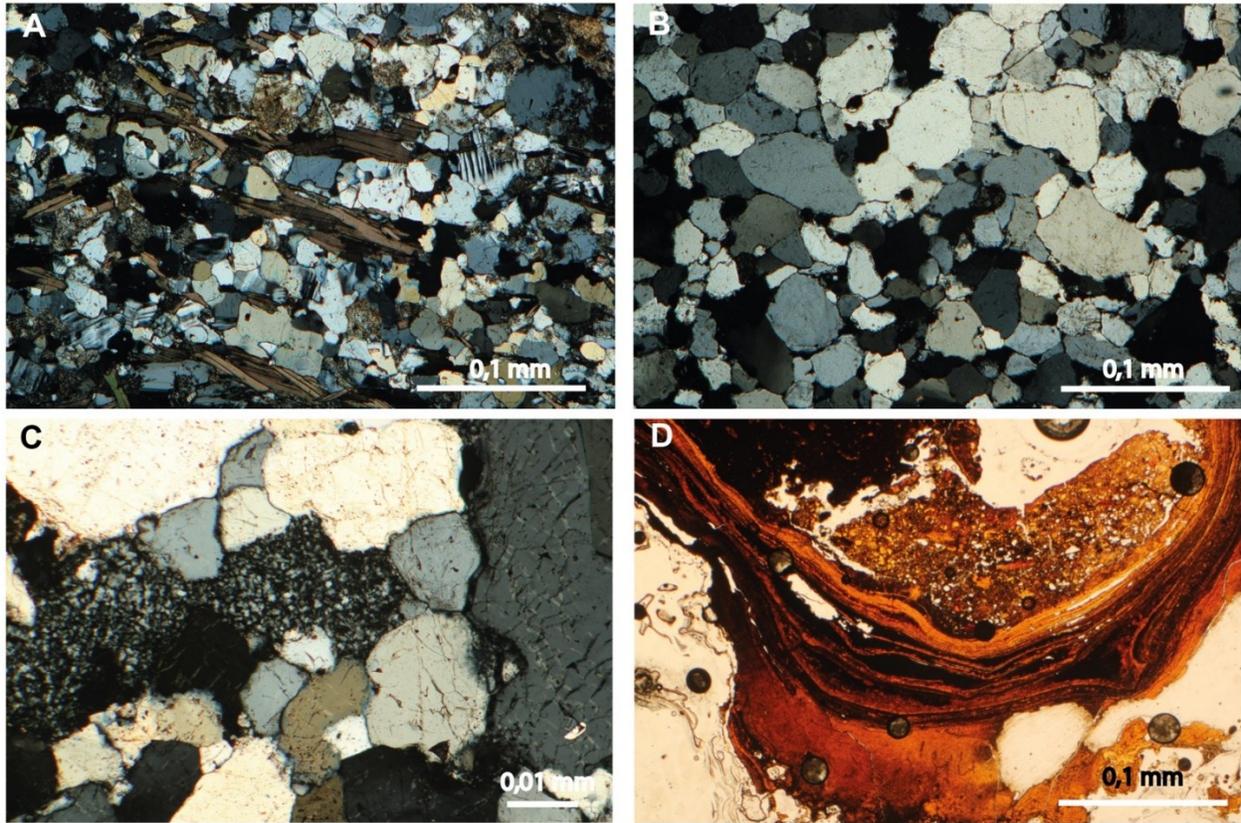


Fig. 7. Lamina delgadas de diferentes litologías documentadas a lo largo de los ríos Caquetá y Yari y en las cuevas: A) Composición granitoide típica del complejo basal de Mitú. B) Cuarzoarenita casi pura que muestra granos entrelazados y sobrecrecimientos sintaxiales. C) Cuarzoarenita colectada en los tepuyes de Yari, con sobrecrecimientos sintaxiales y cementación calcedónica. D) Capas de oxido-hidróxidos de hierro y sílice amorfa recogidas en la capa de tipo BIF descubierta en la cueva de Ononeñagoda.

#### 4.2 Observaciones sobre la petrografía y disolución del cuarzo

Se recogieron ocho muestras de rocas para estudios petrológicos en laminas delgadas e imágenes-análisis SEM-EDX con el fin de corroborar los datos de la literatura sobre esta región. El Complejo Migmatítico de Mitú se encontró a lo largo del río Yari con gneises migmatíticos y graníticos típicos (área de "La Campana"), antes de la unión con el río Mesay (Fig. 7A). La base de la secuencia sedimentaria fue muestreada tanto en el fondo del barranco de Araracuara como en el de Gamitana. Se confirma la presencia de arcillo-areniscas con micas en el fondo de la secuencia en Puerto Arturo (Araracuara), pero no identificamos en estos lechos ningún icnofósil. En Gamitana las areniscas de la base muestran un mayor contenido en cuarzo e hidróxidos de hierro. En el Cabezón (aproximadamente 45 m por encima de Gamitana), la arenisca cuarzosa es casi pura (>95% cuarzo) y muestra en sección delgada claras estructuras entrelazadas debidas al crecimiento diagenético de cemento sintaxial (Fig. 7B). La zona de las cuevas de Yari (aproximadamente 140 m por encima del basamento) también muestran una arenisca cuarzosa casi pura con estructura entrelazada y menores hidróxidos de hierro (Fig. 7C).

Dentro de las cuevas también fue posible documentar y muestrear una clara capa de 20-30 cm de espesor de óxidos e hidróxidos de hierro que aparecen como goethita y hematita alternados a capas de sílice amorfa (cuya composición fue averiguada en las observaciones de láminas delgadas y medidas Raman, Fig. 7D).

Para averiguar la presencia de micromorfología típica de la disolución del cuarzo, se han obtenido imágenes SEM de tres muestras de cuarzoarenita recogidas en las cuevas. Las muestras recogidas en techos, suelos y en la parte interior de pilares en forma de embudo, se caracterizaron por una cohesividad diferente. Las muestras más cohesivas mostraron soldaduras abundantes entre los granos por un sobrecrecimiento de cuarzo sintaxial generalizado, pero por el contrario las muestras meteorizadas, menos cohesivas, mostraron una amplia red de huecos entre los granos. En estas últimas muestras, las superficies de los granos de cuarzo también se caracterizaron por un picado por disolución generalizado (Fig. 8).

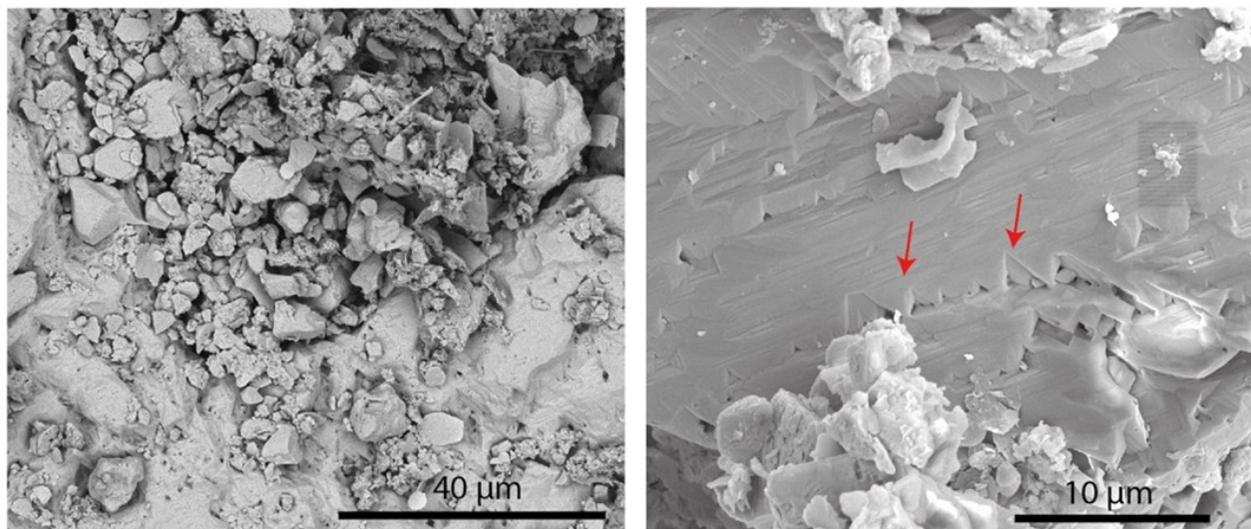


Fig. 8. Imágenes SEM de muestras de cuarzoarenita con diferente grado de cohesividad de los granos de cuarzo que se caracterizan claramente por morfologías de disolución como típica caries en formas de "v" debida a disolución intergranular (flecha roja en la imagen a la derecha).

### 4.3 Resultados de análisis hidroquímicos

Las muestras, los lugares de muestreo y los resultados analíticos figuran en la tabla 1. La Fig. 9 reporta la relación entre parámetros físicos (pH y EC) y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) de las muestras de agua (naranja), comparándolas con análisis en literatura de los tepuyes Auyán, Chimantá y Roraima en Venezuela (azul). Siguiendo la clasificación propuesta por Mecchia et al. (2014), las muestras de agua se han agrupado según su procedencia y características en cuatro grupos hidroquímicos que se indican a continuación:

- Arroyos superficiales que fluyen en la meseta y cascadas que se hunden en las entradas de las cuevas
- Arroyos subterráneos
- Aguas de infiltración de goteo lento a lo largo de pequeñas fracturas
- Ríos mayores que fluyen en el pedimento de las tierras bajas que rodean el tepuy.

Las aguas de arroyo superficiales están representadas por la muestra Yw7, recogida en un arroyo que fluye de la pared del tepuy hacia el campo base, y la muestra Yw8 que representa el arroyo principal del Valle de la Danta. El agua que fluye de la meseta presenta un color ámbar (parecido al té), probablemente causado por sustancias húmicas y compuestos de hierro férrico, como se ha demostrado en estudios anteriores (Ertel et al., 1986). El pH es ácido, normalmente inferior a 4,3, como resultado de los ácidos orgánicos producidos durante la descomposición anaeróbica de las plantas y la turba. La concentración de sílice es muy baja, 1,5 mg/L por Yw7. Las aguas de los arroyos de las cuevas (muestras Yw1-2-4-6) tienen características similares a las superficiales: muestran pH similar (promedio 4.3), EC (promedio 43  $\mu\text{S}$

cm-1), y concentraciones de  $\text{SiO}_2$  disuelta un poco más elevada (promedio 2.2 mg L-1).

La muestra del goteo Yw3 representa el agua que penetra en el subsuelo a través de pequeñas fracturas interconectadas, ya que era transparente y carecía del típico color ámbar. En comparación con todas las demás muestras de agua, presenta un pH más alto (5.29) una mayor concentración de sílice disuelta (7.4 mg L-1), debido al mayor tiempo de interacción agua-roca.

La muestra recogida en las tierras bajas de los ríos Yará (Yw9), Mesay (Yw10) y Caquetá (Yw0) presentan características muy diferentes en comparación con las demás, como un pH más elevado (7,33). Yará y Mesay son típico "río negro" (color ámbar y rico en sustancias húmicas) con valores de EC muy bajo. Caquetá es un río más rico de sedimentos arcilloso proveniente por la cordillera andina, y por tanto con valores de EC más alto.

### 4.4 Observaciones morfológicas al SEM de espeleotemas de sílice

Las cuevas del río Yará también son ricas en espeleotemas de sílice y sedimentos. Durante la expedición se observaron varios espeleotemas de sílice amorfa, entre ellos, coraloides y estromatolitos esféricos en las paredes y los suelos. La sílice amorfa y el opal se han identificado por espectrometría Raman. Además, hemos observado costras de óxido-hidróxidos de manganeso y hierro, que cubren las superficies de cuarzo arenita y un sulfato identificado por espectrografía Raman, pero todavía no identificado (un análisis más avanzado de XRD a cristal simple está en proceso).

La morfología de estos espeleotemas es muy similar a los diferentes tipos descritos para las cuevas estudiadas en los tepuyes de Venezuela. Una observación preliminar al microscopio electrónico muestra que estas formaciones consisten en acumulaciones de agregados globulares y escamas de sílice amorfa, pro-

bablemente como resultado de una deposición por actividad microbiológica (Fig. 10). Debido a la importancia de los espeleotemas de sílice en el contexto geomicrobiológico (Sauro et al., 2018; Ghezzi et al., 2020), un estudio más específico es en curso y será presentado en futuro.

Tabla 1. Análisis del agua realizados *in situ*

	Descripción	Tipología	SiO <sub>2</sub> mg L <sup>-1</sup>	pH	EC μS cm <sup>-1</sup>
Yw7	Arroyo en el campamento base	Arroyo superficial	1,5	4,2	34
Yw8	Arroyo principal del Valle del Danta	Arroyo superficial		4,27	29
Yw1	Cueva Necaeridagoda – Arroyo	Arroyo subterráneo	1,7	4,29	38
Yw2	Cueva de Necaeridagoda – Resurgencia	Arroyo subterráneo	1,9	4,29	52
Yw6	Cueva Ononeñagoda – Arroyo	Arroyo subterráneo	2,1	4,27	34
Yw4	Cueva Ononeñagoda - Resurgencia	Arroyo subterráneo	3,2	4,4	49
Yw3	Cueva de Necaeridagoda - Goteo	Aguas de goteo	7,4	5,29	12
Yw9	Río Yari en Gamitana	Rio superficial		5,6	9
Yw10	Río Mesay	Rio superficial		5,02	10
Yw0	Agua del río Caquetá	Rio superficial		6,45	61

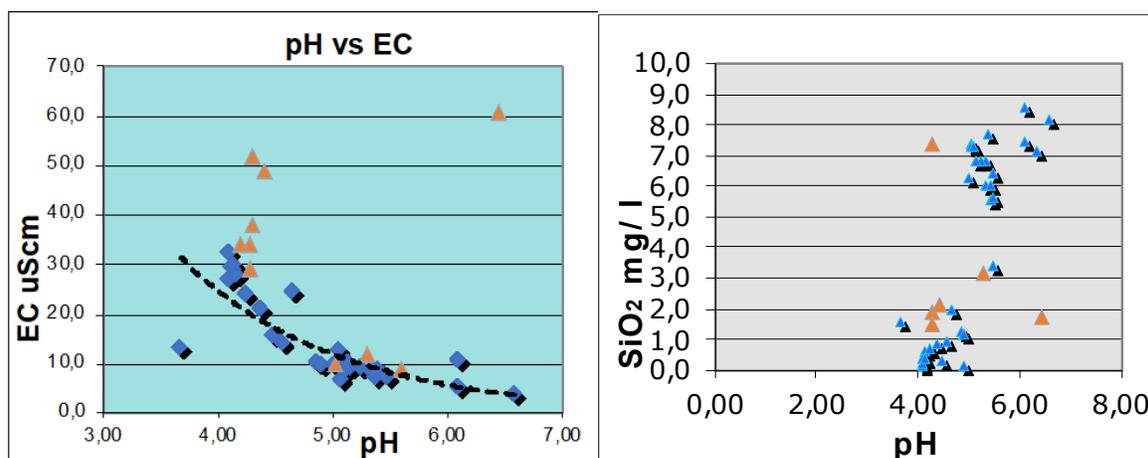


Fig. 9. Ejemplos de correlación entre los parámetros hidroquímicos de las aguas de la cueva de Yari (naranja) y las aguas de otras cuevas de arenisca cuarzosa del Escudo de Guayana (azul) según Mecchia et al., (2014).

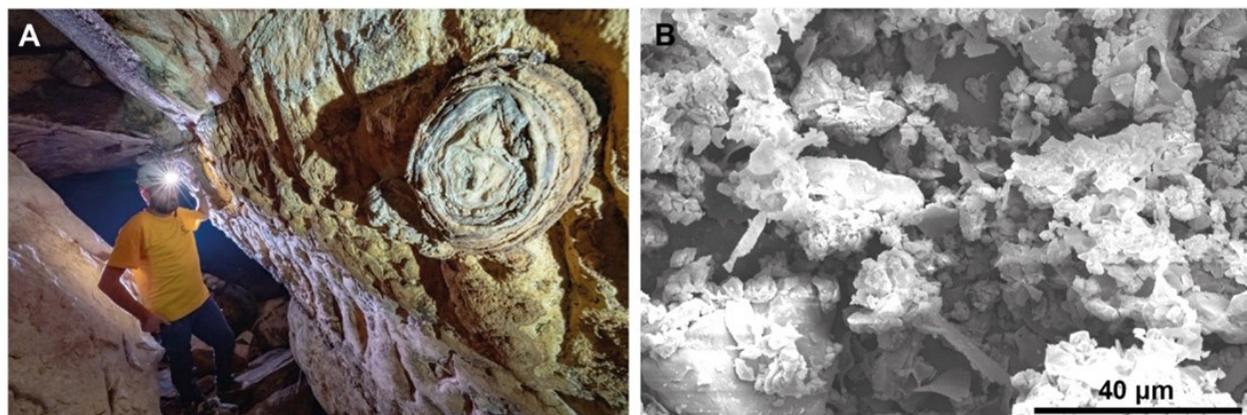


Fig. 10. Espeleotemas de sílice amorfa en las paredes de Necaeridagoda. B) Imágenes SEM de muestras de espeleotema con sílice de aspecto amorfo globular sobre granos de cuarzo. Fotografía: Alessio Romeo/La Venta.

## 5. DISCUSIÓN

Las muestras de diferentes litologías desde el canon de Araracuara hasta las mesetas del Río Yará confirman la secuencia estratigráfica ya descrita por Ibáñez-Mejía et al. (2011). Las cuevas están toda desarrollada en la Formación Araracuara, en niveles de cuarzoarenita casi pura (>95% cuarzo) o con contenidos menores de óxidos de hierro. El control estratigráfico sobre la espeleogénesis es debido a la presencia de un estrato de óxidos de hierro y sílice amorfa, muy similar a las capas de la Formación Hierro en Bandas (BIF) identificadas como estratos guía por la espeleogénesis también en cuevas de la formación precámbrica Mataui en Venezuela (ver referencias a la Cueva Guacamaya y Imawarí Yeuta en Auyán-tepui; Sauro et al, 2013; Sauro 2014).

Las capas encontradas en las cuevas del Río Yará presentan la misma alternancia de niveles de óxidos-hidróxidos de hierro y de sílice amorfa típicas, pero no exclusiva, de las secuencias precámbricas. Este estrato constituye también la base de las paredes de los tepuyes en la zona del Río Yará. Estos descubrimientos plantean algunos interrogantes sobre la edad y origen de la Formación Araracuara. Por ello, deberán realizarse más estudios sobre los posibles microfósiles para confirmar la edad paleozoica de estas formaciones, mientras que las sorprendentes similitudes con la Formación Mataui del Supergrupo Roraima, sugieren que podría ser posible una correlación temporal entre estas zonas del Escudo Guayanés. El problema de la correlación cronológica entre diferentes cuencas sedimentarias durante la evolución del escudo es un debate no resuelto y que necesitaría de otras investigaciones (Gansser, 1974) por ejemplo a través de análisis de zircones y apatitas.

Las cuevas muestran morfologías muy similares a las de las areniscas cuarzosas estudiadas en los tepuyes venezolanos y en otras zonas del mundo (Wray y Sauro, 2017). Mientras que la cueva de Los Guácharos es una típica cueva de areniscas cuarzosas formada debido a la ampliación erosiva de una fractura cercana al borde del cañón del río Caquetá en Araracuara, las otras dos cuevas son típicas de espeleogénesis controladas por estratos (Fig. 6), como se ha descrito previamente para otros casos como las Cueva Guacamaya y Imawarí en Auyan Tepuy (Sauro, 2014; Sauro et al., 2013).

El agua se infiltró a lo largo de fracturas desde la parte superior de la meseta del tepuy hasta la capa más débil de óxido-hidróxido de hierro observados en Ononeñagoda. El lento movimiento del agua a lo largo de esta capa durante millones de años permitió la disolución de la sílice intergranular y el aumento de la porosidad de la arenisca cuarzosa. Los estudios (Reardon, 1979) sugieren

que los complejos hierro-silicato (como  $\text{Fe-H}_2\text{SiO}_4$ ) podrían aumentar la solubilidad del cuarzo en soluciones de hierro ferroso en condiciones oxidantes, y la solubilidad potencial del cuarzo aumenta en un factor 10 con respecto a la de la sílice amorfa. Por lo tanto, las capas de hidróxido de hierro situadas en unas pocas posiciones estratigráficas podrían haber sido vías favorables para la formación de protoconductos de drenaje iniciales (Wray, 2009), promoviendo la infiltración de agua meteórica en los estratos fracturados alrededor.

Los análisis químicos de las aguas confirman esta hipótesis. La composición química de las aguas se utiliza generalmente para investigar los procesos de interacción agua-roca, reconstruir la evolución geoquímica del agua y mejorar la comprensión de los mecanismos de disolución. Este enfoque se ha aplicado en terrenos dominados por el cuarzo como herramienta fundamental para comprender el papel de la meteorización por disolución en competencia con otros procesos (hidrólisis, erosión mecánica, meteorización salina, etc.).

Los arroyos de las cuevas de Yará se pueden clasificar claramente como aguas negras típicamente amazónicas (también son de color ámbar) con valores muy ácidos, entre 4,2 y 4,4 y con una conductividad eléctrica muy baja. Las muestras siempre estuvieron subsaturadas en sílice, con la excepción de una muestra de goteo recogida de una fractura, que mostró un pH de 5,3 y un contenido en sílice disuelto de 7,4 mg/L. La presencia de sílice abundante disuelto en el agua de los goteos, concuerda con lo observado en otras cuevas de areniscas cuarzosas de Sudamérica (Mecchia et al., 2014), destacando el papel de la disolución intergranular que aumenta la porosidad global de la roca y conduce al proceso final de "arenización" descrito por la primera vez por Martini (1979).

También el análisis petrográfico confirma la presencia de micro morfologías típica de la disolución del cuarzo. Las muestras recogidas en techos, suelos y en la parte interior de pilares en forma de embudo, se caracterizaron por una cohesividad diferente. Las muestras más cohesivas mostraron soldaduras abundantes entre los granos por un sobrecrecimiento de cuarzo syntaxial generalizado, pero por el contrario las muestras meteorizadas, menos cohesivas, mostraron una amplia red de huecos entre los granos. En las muestras meteorizadas las superficies de los granos de cuarzo también se caracterizaron por un picado por disolución a lo largo de los granos/sobrecrecimientos de cuarzo que parecen estar "controladas por la superficie" (Burley y Kantorowicz, 1986).

Estas morfologías microscópicas son típicas de cinética lenta, tales como picaduras bien definidas, en forma de V (Fig. 8).

La disolución es más activa en sitios de alta energía como los bordes de las caras, esquinas y uniones triples de los sobrecrecimientos de cuarzo (White y Peterson, 1990), liberando gradualmente los contactos de los granos.

Por lo tanto, todos los datos recogidos sugieren que las cuevas de Yará son un producto típico del proceso de disolución intergranular y consiguiente arenización focalizado a lo largo de estratos, sugiriendo que la edad de los conductos podría ser de más de 30 millones de años, como se propone para sus homólogos en los tepuyes venezolanos. En las cuevas de Yará se pudo observar un proceso activo de erosión descendente a lo largo del buzamiento de los estratos, responsable del retroceso en escarpa de los tepuyes y de la formación de las grandes simas en la parte interior de la meseta.

La presencia de espeleotemas de sílice con estructuras similares a las ya observadas para los estromatolitos de sílice de tepuyes venezolanos y de las cuevas cuarcíticas de Minas Gerais, confirman también la presencia de procesos microbiológicos que probablemente promueven aún más la disolución del cuarzo. Son necesarios, no obstante, más estudios en el futuro para poder afirmar con certeza que se trata de los mismos procesos geomicrobiológicos ya observados en otros lugares del Escudo de Guayana.

## 6. CONCLUSIONES

El escaso tiempo disponible y el complejo esfuerzo logístico necesario para llegar a los tepuyes de Yará, no permitieron explorar otras dos cuevas conocidas por los indígenas, y aún queda mucho por explorar en esta zona. Los datos recogidos muestran que los tepuyes pertenecientes a la cadena montañosa de Chiribiquete son extremadamente ricos en cuevas. Teniendo en cuenta la enorme extensión de Chiribiquete (un macizo que se extiende casi 270 km de norte a sur), está claro que hay un enorme potencial de cuevas y ecosistemas subterráneo en esta región. En general, el interés geológico de las cuevas es muy elevado debido a su similitud con otros sistemas cavernícolas descritos en los tepuyes venezolanos y brasileños.

Una vez más, la espeleogénesis parece deberse a la disolución intergranular del cuarzo y a los consiguientes procesos de arenización y erosión subterránea. Los datos de los análisis químicos del agua y las observaciones al microscopio electrónico, confirman que los mismos procesos espeleogénicos observados en otras zonas del Escudo de Guayana también estuvieron activos en este sector del Chiribiquete, y probablemente, en toda la extensión de la formación Araracuara. Además, resulta interesante encontrar

estructuras de estromatolitos de sílice muy similares a los encontrados en los tepuyes Auyan y Chimanta, situados a 1300 km de distancia y en una cuenca fluvial diferente (Orinoco). Ya muchos estudios han demostrado que estos espeleotemas se han formado por la acción de colonias bacterianas con metabolismos y estructuras peculiares. El descubrimiento del mismo morfotipo de espeleotema en las cuevas del Río Yará, sugiere que la misma familia de colonias microbianas quimiolitotrofas existen en diferentes cuevas en cuarzoarenitas de la Cuenca Panamazónica.

La presencia de sistema de cuevas en cuarzoarenitas en diferentes contextos del escudo precámbrico, con las mismas características genética, sugieren que todas las rocas sedimentarias pertenecientes al Escudo de Guayana podrían haber albergado cuevas y antiguos ecosistemas subterráneo a lo largo de varios miles de kilómetros en la zona del Amazonas y el Orinoco. Esta hipótesis es todavía especulativa, pero merece un atento análisis en futuras exploraciones subterránea de otros macizos en la cuenca amazónica y en el Orinoco.

Parece cierto que lo observado en Chiribiquete es sólo un remanente de un paisaje superficial que probablemente estaba mucho más extendido e interconectado en los primeros tiempos del Cenozoico. La zona de los tepuyes de Yará, y en general de la Sierra de Chiribiquete, son lugares prístinos de interés fundamental para estudiar y comprender estos aspectos geológicos de los extremos occidentales del Escudo de las Guayanas. Las cuevas exploradas son las más largas y voluminosas de arenisca cuarzosa descubiertas hasta ahora en Colombia. Toda esta información es ahora bien conservada por la comunidad indígena Uitoto de Monochoa y debería utilizarse en el futuro para proteger y gestionar sus tierras.

### Financiación

Este proyecto fue financiado por el programa *Rolex Perpetual Planet*, con el soporte económico de *La Venta Esplorazioni Geografiche*.

### Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

### Reconocimientos

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de un grupo internacional de espeleólogos y sobre todo del compromiso de la Comunidad Indígena del Resguardo Monochoa y varios participantes Andoque. Agradecemos en particular a Rogelio Mendoza y todos los indígenas participantes en la expedición: Eusebio

Mendoza (Uitoto, Comunidad Monochoa), Nicolas Mendoza (Uitoto, Comunidad Monochoa), Narciso Perdomo Cabrera (Uitoto, Comunidad Cano Negro), Efrén Jonás Rodríguez (Uitoto, Comunidad Amenaní), Jeth-Li Mendoza Matapi (Uitoto, Comunidad Monochoa), Enoc Ortiz Tivoli (Uitoto, Comunidad Chukikt), Wilmer Anderson Valencia (Uitoto, Comunidad Monochoa), Edward Deibis Gómez (Uitoto), Salvador Andoque (Andoque), Néstor Andoque Macuna Riquísimo-raque (Andoque), Juan Gómez Hernández (Andoque), Manuela Orfelina Ranoque (Uitoto).

Un agradecimiento especial a Daniel Straley por iniciar el proyecto con La Venta y a Jules Domine y Emile Domine (AADO Media) por el impresionante esfuerzo logístico en la organización de la expedición; igualmente al Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y la Asociación Colombiana de Espeleología (Espeleocol).

Un agradecimiento a Paolo Gasparetto y Fabio Tosato (*Raman Spectra*, Padova) por los análisis Raman, y a la profesora María Roberta Randi por la realización de las imágenes al SEM en el Departamento BIGEA de la Universidad de Bologna.

El proyecto cuenta con el apoyo de la iniciativa *Perpetual Planet de Rolex* y con la asistencia técnica de *Ferrino, Hennessy Hammock, Tiberino y Amphibious*.

## REFERENCIAS

- Aubrecht, R., Barrio-Amorós, C.L., Breure, A.S.H., Brewer-Carías, C., Derka, T., Fuentes-Ramos, O.A., Gregor, M., Kodada, J., Kováčik, L., Lánzos, T., Lee, N.M., Liščák, P., Schlögl, J., Šmída, B. and Vlček, L., (2012). Venezuelan tepuis: their caves and biota. *Acta Geologica Slovaca Monograph*, Comenius University, Bratislava, 168 pp.
- Burley, S. D., & Kantorowicz, J. D. (1986). Thin section and SEM textural criteria for the recognition of cement-dissolution porosity in sandstones. *Sedimentology*, 33(4), 587-604.
- Ertel, J., Hedges, J., Devol, A., Richey, J., de Nazare Goes Ribeiro, M., Ribeiro, G., (1986). Dissolved humic substances of the Amazon River system. *Limnology and Oceanography* 31(4), 739-754.
- Galvis, J., Huguett, A. y Ruge, P. (1979). Geología de la Amazonía colombiana. *Boletín Geológico*, 22(3): 3-86.
- Gansser, A., (1974). The Roraima problema (South America). *Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der ETH und der Univ. Zürich; neue Folge*, 177: *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft*, Basel, Vol. 84, 1, 80-100.
- Ibáñez-Mejía, M., Ruiz, J., Valencia, V.A., Cardona, A., Gehrels, G.E. y Mora, A.R. (2011). El Orógeno Putumayo de Amazonia y sus implicaciones para las reconstrucciones de Rodinia: New U- Pb geochronological insights into the Proterozoic tectonic evolution of northwestern South America. *Precambrian Research*, 191(1-2): 58-77.
- Lafuente B, Downs RT, Yang H, Stone N. 1. The power of databases: The RRUFF project. Highlights in mineralogical crystallography. De Gruyter (O), (2015), pp. 1-30.
- Martini, J.E.J., (1979). Karst in Black Reef quartzite near Kaapsehoop, Eastern transval. *Annals of South African Geological Survey*, 13: 115-128.
- Mecchia, M., Sauro, F., Piccini, L., De Waele, J., Sanna, L., Tisato, N., Lira, J. and Vergara, F., (2014). Geochemistry of surface and sub-surface waters in quartz-sandstones: significance for the geomorphic evolution of tepui table mountains (Gran Sabana, Venezuela). *Journal of Hydrology*, 511: 117-138.
- Mojica, J. y Villarroel, C., (1990). Sobre la distribución y facies del Paleozoico Inferior sedimentario en el extremo NW de Sudamérica. *Geología Colombiana*, 17: 219-226.
- Muñoz-Saba, Y., I. González-Sánchez y N. Calvo-Roa (Editores) (2013). *Serie Guías de Campo del Instituto de Ciencias Naturales*, Universidad Nacional de Colombia N° 13. Bogotá, 325 pp. Bogotá, 325 pp.
- Polok, M., Wójcicki, J., Słupińska, M. (2012). Cave Sniper. *EuroSpeleo Magazine* 1(1): 76-78.
- Reardon, E.J. (1979). Complexing of Silica by Iron(III) in Natural Waters. *Chemical Geology*, 25: 339-345.
- Santos, J. O. S., Potter, P. E., Reis, N. J., Hartmann, L. A., Fletcher, I. R., & McNaughton, N. J. (2003). Age, source, and regional stratigraphy of the Roraima Supergroup and Roraima-like outliers in northern South America based on U-Pb geochronology. *Geological Society of America Bulletin*, 115(3), 331-348.
- Sauro, F., (2014). Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: Evidence of the arenisation process. *Geomorphology*, 226: 106-123.
- Sauro, F., Lundberg, J., De Waele, J., Tisato, N. y Galli, E., (2013). Speleogenesis and speleothems of the Guacamaya Cave, Auyan Tepuy, Venezuela, *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, Brno, pp. 298-304.
- Sauro, F., (2014). Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: Evidence of the arenisation process. *Geomorphology*, 226: 106-123.
- Urbani, F. and Szczerban, E., (1974). Venezuelan caves in non-carbonate rocks: a new field in karst research. *NSS News*, 32: 233-235.
- Urbani, F., 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. *Interciencia*, 11(6): 298-300.
- Vergara, J. G. (1994). Chiribiquete y zonas aledañas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 19(73).
- White, W.B., Jefferson, J.I., Haman, J.F., (1966). Quartzite karst in Southeastern Venezuela. *International Journal of Speleology*, 2: 309-314.
- Witthe, A. F., & Peterson, M. (1990). The role of reactive surface areas in chemical weathering. *Chemical Geology*, 84(1-4), 334-336.
- Wray, R.A. y Sauro, F. (2017). An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, 171: 520-557.
- Wray, R.A.L., (2009). Conductos de drenaje freático en areniscas cuarzosas: Evidence from the Jurassic Precipice Sandstone, Carnarvon Range, Queensland, Australia. *Geomorphology*, 110(3): 203-211.