



ESPELEOGÉNESIS EN PLATAFORMAS ARRECIFALES MIOCENAS. EL KARST DE BOCA DE JARUCO (MAYABEQUE-CUBA)

Speleogenesis in Miocene reef platforms. The Boca de Jaruco karst (Mayabeque-Cuba)

Antonio González-Ramón¹, Vladimir Otero-Collazo²⁺, Leslie Molerio-León³, Marian Alonso-Martínez⁴ y Oriol Chávez-Bonora⁵

¹ Instituto Geológico y Minero de España-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Urb. Alcázar del Genil, 4 Edf. Zulema bajo, 18006, Granada, España. antonio.gonzalez@igme.es. Asociación Espeleológica Velezana, Vélez Rubio, Almería-España.

² Grupo Ciro Berrios, Sociedad Espeleológica de Cuba. La Habana, Cuba

³ Inversiones Gamma, S.A. Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba. especialistaprincipal@gmail.com

⁴ Sociedad de Ciencias Espeleológicas Alfonso Antxia. Bilbao-Bizkaia, España. alonso.mariam@gmail.com

⁵ Grupo Martel, Sociedad Espeleológica de Cuba. La Habana, Cuba

Resumen: El karst de Boca de Jaruco tiene una superficie de tan solo 3 km² donde se conocen 18 cavidades. Se trata de una plataforma costera formada por carbonatos arrecifales en los que se diferencian tres formaciones de edad Mioceno inferior - Pleistoceno. En 6 de las cuevas se dispone de una topografía de detalle que incluye modelos digitales 3D. En la de mayor extensión, denominada Cinco Cuevas, se han estudiado los rellenos sedimentarios existentes, los rellenos por colapsos, espeleotemas y las morfologías de condensación-corrosión que se observan en sus paredes. Además, se tomaron muestras de agua de goteo y de aguas freáticas en las tres cavidades que alcanzan este nivel y en otras partes del acuífero. También se instalaron sensores de presión, temperatura y conductividad eléctrica en estas zonas inundadas para estudiar el grado de conexión de las cuevas con el mar. Los resultados demostraron la influencia de las mareas y la presencia de mezclas de aguas de diferente salinidad en el agua almacenada en el acuífero. Se propone un modelo espeleogenético que se iniciaría en el Plioceno o Pleistoceno inferior influenciado por movimientos tectónicos y eustáticos donde las mezclas de agua salada-dulce habrían jugado un papel fundamental.

Palabras clave: Cavidades kársticas, disolución-corrosión, influencias de mareas, mezclas de aguas, plataformas costeras, rellenos en cuevas.

Abstract: Between 2019 and 2020, several work campaigns were carried out in the Boca de Jaruco karst, which resulted in new advances in the knowledge of the genesis of these cavities. The Boca de Jaruco karst has a surface area of only 3 km² where 18 cavities of speleological interest are known. It is a coastal platform formed by reef carbonates in which three formations of ages ranging from the Lower Miocene to the Pleistocene can be distinguished. The area studied extends along the right bank of the Jaruco River to its mouth. In six of the caves, a detailed topography including 3D digital models is available. In the largest cave, known as Cinco Cuevas, we studied the existing sedimentary fills, collapse fills, speleothems and the morphologies of condensation-corrosion observed on its walls. In addition, drip water and groundwater samples were taken in the three cavities that reach the water table and in other parts of the aquifer. Pressure, temperature and



electrical conductivity sensors were also installed in these flooded areas to study the degree of connection of the caves with the sea. The results showed the influence of tides and the presence of water mixtures of different salinity in the water stored in the aquifer. A speleogenetic model is proposed that would begin in the Pliocene or Lower Pleistocene influenced by tectonic and eustatic movements where salt-fresh water mixtures would have played a fundamental role.

Keywords: Karst caves, dissolution-corrosion, tidal influences, water mixing, coastal platforms, cave fills.

González-Ramón, A., Otero-Collazo, V., Molerio-León, L., Alonso-Martínez, M., Chávez-Bonora, O., 2023. Espeleogénesis en plataformas arrecifales miocenas. El karst de Boca de Jaruco (Mayabeque-Cuba). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 36 (2): 102-115.

Introducción

Uno de los rasgos que caracterizan a la Isla de Cuba es el extraordinario karst tropical desarrollado sobre los carbonatos que salpican buena parte de su geografía. La existencia de abundantes precipitaciones (1375 mm de media según Molerio-León, 1992), una notable extensión de afloramientos de carbonatos (66% del territorio) y una temperatura media anual elevada (24°C) (Magaz, 2017) aportan las condiciones ideales para que hayan podido formarse grandes cavidades de dimensiones kilométricas y una belleza inigualable. La mayoría de estas cavidades presentan los rasgos característicos de cuevas epigénicas tropicales, muchas de ellas esculpidas en mogotes, con sumideros por donde penetran los cauces de los ríos, para surgir con mayores caudales tras largos

recorridos subterráneos. Pero en Cuba existen también cuevas que no responden a estos condicionantes, donde las morfologías de los conductos kársticos, sus patrones de distribución espacial, su desconexión con cauces superficiales y la inexistencia de marcas de corrientes y rellenos sedimentarios de origen fluvial, pueden deducirse procesos espeleogenéticos no relacionados con aguas de infiltración rápida que penetran desde la superficie del terreno.

En la costa norte de la isla, entre La Habana y Matanzas, se localizan varias llanuras costeras formadas en plataformas de calizas arrecifales (Fig. 1A) donde existen numerosas cuevas con rasgos característicos (cavidades kársticas litorales, incluyendo tipologías *flank margin*, cuevas de abrasión marina, surgencias costeras en cavidades, cuevas mixtas epigénicas-hipogénicas) (Molerio León, 2013; De Waele *et al.*, 2018).

Boca de Jaruco es una de estas zonas (Fig. 1B), donde distintas generaciones de espeleólogos cubanos han ido localizando, explorando y documentando un buen número de cavidades en las que se observan morfologías de corrosión y rellenos de sedimentos y espeleotemas que no se corresponden con las típicas cavidades desarrolladas en el karst tropical. Actualmente se conocen 18 cavidades, concentradas en una superficie de tan solo 3 km² (Otero-Collazo y Zaldivar-Chateloin, 1986). Los procesos espeleogenéticos no están del todo definidos y los trabajos científicos publicados que aborden la génesis de estas cavidades son hasta ahora escasos (Acevedo-González, 1967; Otero-Collazo *et al.*, 2021; Magaz, 2021).

Las campañas cubano-españolas realizadas en los años 2019 y 2020 han tenido como objetivo principal estudiar las morfologías y los rellenos sedimentarios que se observan en las cuevas de Boca de Jaruco, proponer los posibles mecanismos que dieron lugar a este conjunto de cavidades y estudiar su evolución en el tiempo.

Localización geográfica y geológica

Las cuevas estudiadas se encuentran entre el estuario del río Jaruco (Boca de Jaruco) y la ensenada de los Roncos. La zona está compuesta esencialmente por calizas arrecifales masivas del Mioceno medio (Formación Güines) que buzan ligeramente hacia el norte

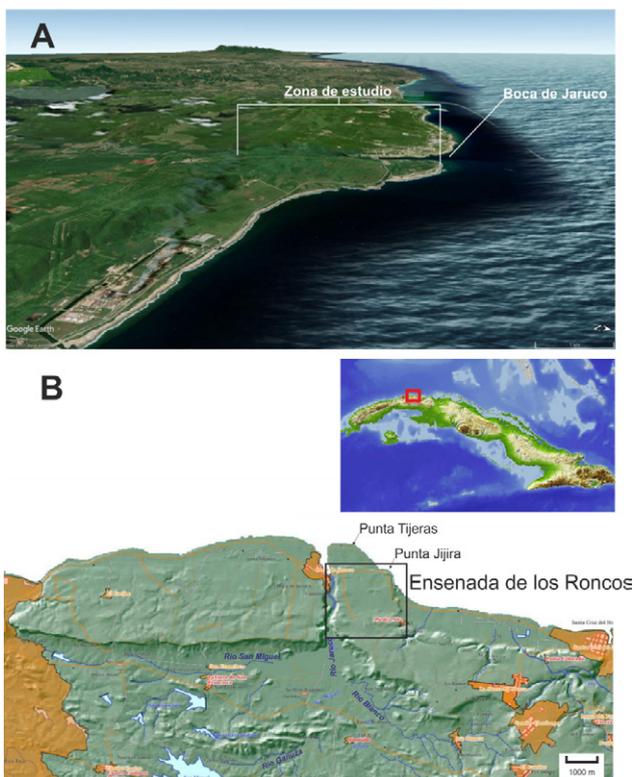


Fig. 1.- A) Imagen 3D generada por Google Earth de la línea de costas donde se localiza la zona estudiada. B) Localización del área de estudio.

(Acevedo-González, 1967; De Albear e Iturralde, 1978) y tienen un espesor de 50-60 m y por calizas arenosas algo margosas de la Formación Cojimar de edad Mioceno inferior y medio. Sobre la primera, y recubriéndola parcialmente, se encuentra otra formación arrecifal del Plioceno – Pleistoceno inferior y de escaso espesor (Formación Vedado). Además, existe otra formación del Pleistoceno superior (Chappell, 2002; Muhs, 2017), también arrecifal, que aparece ligada a la línea de costas y que se superpone a todas las anteriores (Formación Jaimanitas). Finalmente, el sustrato general está formado por los materiales flyschoides del Cretácico superior de la Formación Vía Blanca (De Albear e Iturralde-Vinent, 1978) (Figs. 2 y 16B).

El elemento geomorfológico que define la zona son las Llanuras Costeras, cuya anchura varía entre 1 y 3 km (Du-

cloz, 1963; Iturralde-Vinent, 1985). En la zona se reconocen bien tres superficies de erosión principales por encima del nivel del mar (S1, S2 y S3 en Fig. 3B) aunque subdivididas en otras menores. Magaz (2021) diferencia seis terrazas que se desarrollan hasta la cota 55 m (Fig. 3A); a las dos terrazas más elevadas (5 y 6) les asigna una edad Plioceno superior-Pleistoceno inferior; a la 4 Pleistoceno inferior y medio; la 2 y 3 al Pleistoceno medio y la 1 al Pleistoceno superior.

El exokarst se caracteriza por la presencia de un denso lapiaz en “diente de perro”, generado bajo cobertura edáfica (*biokarst pits* según la clasificación de Lundberg, 2013), aunque actualmente expuesto en muchas zonas, lo que dificulta enormemente caminar por su superficie. Otro rasgo característico son las dolinas de hundimiento que se reconocen fácilmente por ser los puntos donde se concentra el arbolado de mayor porte. Las bocas de la mayoría de las cavidades se abren precisamente en estas dolinas (Magaz, 2017) (Fig. 3B).

Metodología

Muestras de aguas

Entre el 28 de febrero y el 4 de marzo de 2020 se tomó una muestra de agua en un manantial localizado junto a la población de Boca de Jaruco, cerca del cauce del río en su margen izquierda; otra en un sondeo particular situado en la misma población y utilizado para uso doméstico y cuatro más se recolectaron en las únicas cavidades donde se alcanza el nivel saturado del acuífero de Boca de Jaruco, una en la Cueva de El Aura, otra en la Cueva de El Cable y dos en Cinco Cuevas. En esta última cavidad se tomó una muestra en la galería más profunda sifonada que corta el nivel freático y otra en una galería semi-inundada antes de alcanzar esta, que se interpreta que aparece semicolgada y

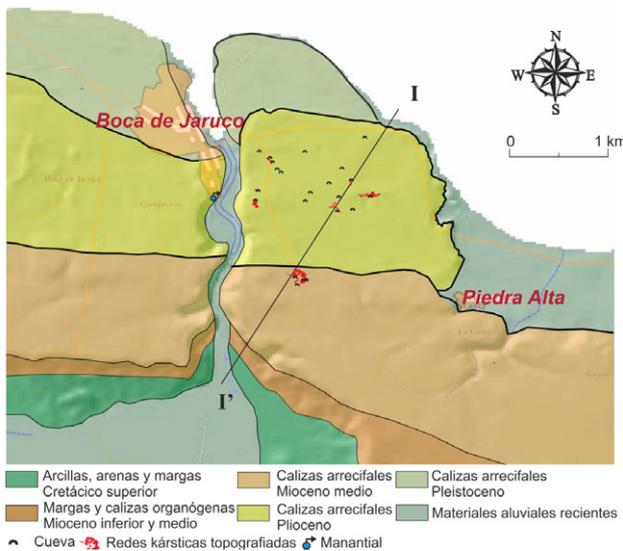


Fig. 2.- Mapa geológico del karst de Boca de Jaruco. La línea negra corresponde a la traza del corte de la Fig. 16.

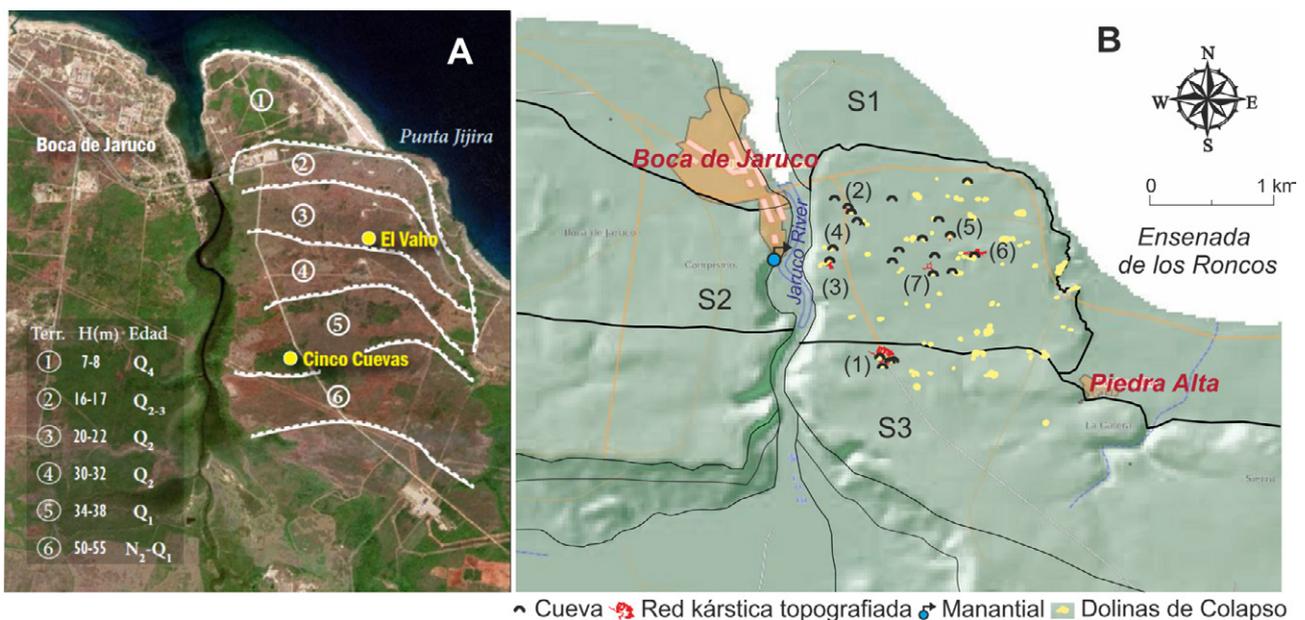


Fig. 3.- A) Terrazas formadas por abrasión marina diferenciadas por Magaz (2021). B) Relación entre dolinas, cuevas y superficies de erosión (S1, S2 and S3). (1) Cinco Cuevas, (2) Cueva de La H, (3) Don Martín, (4) Las Muelas, (5) El Aura, (6) El Vaho, (7) El Cable.



Fig. 4.- A) Toma de muestras de agua de goteo de estalactitas en el Salón Bonito (Cinco Cuevas). B) Labores de topografía en la cueva de la H. C) Medidas de CE y Tª del agua en la zona saturada de la cueva del Aura.

alimentada durante las crecidas del nivel y por el agua de escorrentía que penetra hacia la base de la cueva. En Cinco Cuevas se tomaron, además, dos muestras procedentes del goteo de estalactitas en el Salón Bonito (Figs. 4A y 8) y una tercera muestra en el mismo sitio varios meses más tarde, en diciembre de 2020. Se tomaron dos muestras en cada punto en botellas de polietileno de 150 ml de doble tapón, una para componentes químicos y otra para isótopos estables de oxígeno e hidrógeno. Las muestras se guardaron

en frigorífico hasta su envío a laboratorio. En todas ellas, excepto en las de goteo, se midieron *in situ* la Conductividad Eléctrica (CE), el pH y la temperatura (Tª) mediante un medidor portátil (WTW® 340i) para la CE y (WTW® 315i) para el pH (Fig., 4C). La precisión fue de ± 0,5% para la CE y de ± 0,03 para el pH.

Las determinaciones analíticas de las muestras de agua (Tabla 1) se realizaron en el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Los elementos mayoritarios (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, F⁻, Br⁻, HCO₃⁻², NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄⁻³ y SO₄⁻²) fueron medidos por un cromatógrafo iónico de alta presión (HPIC; METROHM® Compact 881 IC Pro) con una precisión de ±2%. El δ¹⁸O y δ²H en el agua fue medido utilizando espectrómetros láser de anillo descendente de dos cavidades PICARRO™ CRDS L2120-i para δ¹⁸O y δ²H referidos al estándar internacional V-SMOW (<https://www.picarro.com/sites/default/files/L2120-i%20Datos-heet.pdf>). La precisión de las mediciones isotópicas fue de ±0,1‰ para δ¹⁸O y ± 1‰ para δ²H.

Cartografía de las cavidades

Durante las diferentes campañas de trabajo en la zona se han realizado levantamientos cartográficos de precisión en seis de las cuevas más importantes, que han incluido un modelo tridimensional en cada una de ellas (Fig. 4B). Las topografías se han realizado con un medidor de Leica Disto X310 modificado, que permite medir en un

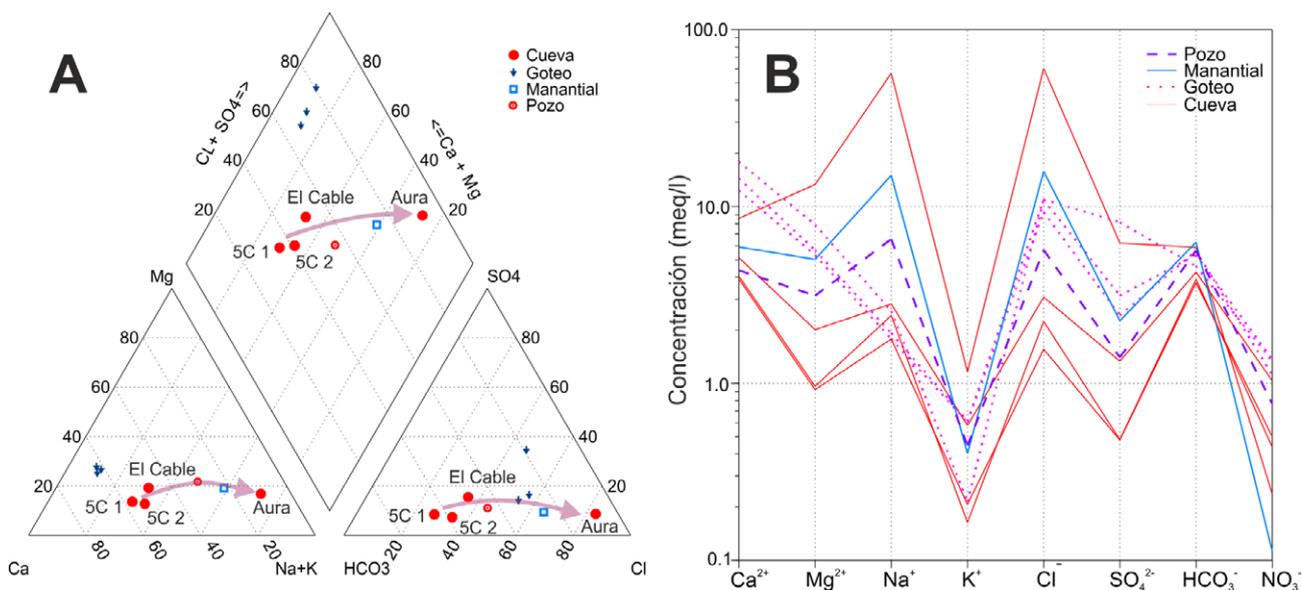


Fig. 5.- A) Diagrama de Piper y B) de Shochoeffler Berkaloff de las muestras analizadas. La flecha morada indica en grado de mezcla con agua marina.

ID	Nombre	Fecha	CE (µS/cm)	Tª (°C)	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻²	PO ₄ ⁻³	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	δ ¹⁸ O [‰]	δ ² H [‰]
BJ-1	manantial	28/02/2020	2570	26,2	7,11	384	561,4	2,4	7,0	0,0	108,5	345,4	15,7	61,1	118,5	-4,03	-20,29
BJ-2	pozo Marimar	04/03/2020	1391	24,5	7,7	345	201,7	1,0	47,6	0,0	67,4	150,4	17,4	38,1	87,5	-3,82	-18,66
BJ-3	zona inundada 1 5C	29/02/2020	585	22,8	7,67	226	55,4	0,5	31,0	0,0	23,0	41,0	8,1	11,2	78,1	-4,02	-18,69
BJ-4	zona inundada 2 5C	29/02/2020	686	24	7,92	237	79,6	0,6	27,1	0-0	23,1	55,7	6,4	11,7	81,0	-4,37	-21,98
BJ-5	cueva del Aura	01/03/2020	7640	25,8	7,6	359	2142,0	8,6	14,7	0,0	298,5	1303,5	45,4	162,0	172,0	-3,36	-15,58
BJ-6	Goteo 1 5C	02/03/2020	325	38,0	1,6	85,0	0,0	150,7	44,3	24,0	69,0	289,0	-3,79	-17,53			
BJ-7	Goteo 2 5C	02/03/2020	342	33,0	1,6	69,2	0,0	116,4	41,1	23,6	64,6	247,7	-3,83	-17,66			
BJ-9	Goteo 3 5c	14/12/2020	2810			281	390,0		83,0		391,0	59,0	8,4	96,0	360,0		
BJ-8	cueva del Cable	03/03/2020	973	27,8	7,08	260	109,0	0,6	64,2	6,3	64,1	64,7	22,6	24,5	103,1	-3,24	-13,95
Lluvia	media lluvia, (Gutiérrez y Travieso, 1974)				5,74	4	2,7				2,38	1,7	0,12	0,3	1,0	-2,74	-16,20

Tabla 1. Valores físico-químicos e isotópicos obtenidos en los muestreos de Boca de Jaruco.

solo disparo distancia, dirección e inclinación. Los datos obtenidos han sido tratados con el software Therion, que ofrece muchas posibilidades, entre ellas una observación de los conductos topografiados en 3D. La precisión de calibración del medidor en los ángulos fue de $\pm 0,2$. La mayor parte del trabajo topográfico ha sido realizado en Cinco Cuevas, con diferencia, la de mayor desarrollo del conjunto de cuevas de la zona. Otras cuevas topografiadas fueron Don Martín, La H, El Aura, Las Muelas y, parcialmente, El Cable (Fig. 7). Asimismo, también se inspeccionó la cueva del Vaho, con el objetivo de realizar en ella distintas observaciones.

Caracterización de rellenos en Cinco Cuevas

Durante la campaña de trabajo realizada en febrero-marzo de 2020 se realizó una cartografía de rellenos en el interior de Cinco Cuevas, que incluyó un levantamiento de cortes estratigráficos de los mismos, para ello se aprovecharon las cicatrices dejadas por las importantes extracciones de guano realizadas por los agricultores de la zona para su uso como fertilizante. Se levantaron 5 cortes que han permitido caracterizar las secuencias estratigráficas de esos rellenos (Fig. 8).

Monitorización del nivel piezométrico

Solo tres de las cuevas conocidas alcanzan el nivel freático del acuífero, la ya citada Cinco Cuevas, El Cable y El

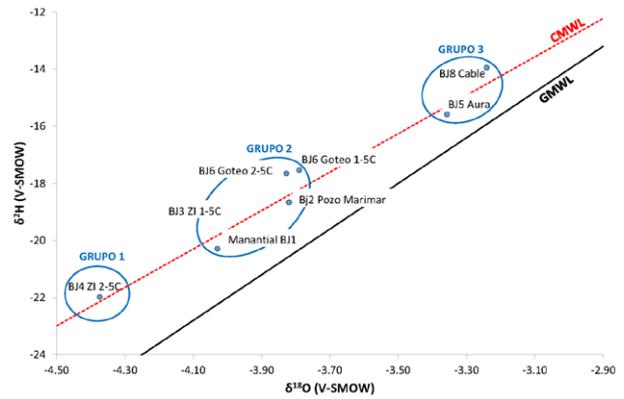


Fig. 6.- Relación entre el $\delta^{18}O$ y el δ^2D para las aguas muestreadas en Boca de Jaruco. Se representan las líneas meteórica Mundial (GMWL) (Craig, 1961) y de Cuba (CMWL) (Molerio-León, 1992).

Aura. Las tres se alinean en una dirección SO-NE, con una mayor cercanía a la línea de costa desde Cinco Cuevas hacia el Aura. Esta alineación no tiene relación con fracturas ni con directrices tectónicas. Aprovechando esta alineación se instaló un sensor CTD-Diver® de medidas de evolución de nivel, CE y T^a con una cadencia de medidas diezminutal en la zona inundada de Cinco Cuevas entre los días 1 y 3 de marzo de 2020 que después se trasladó a la cueva del Aura entre los días 4 y 8 de marzo. Los datos de variación del nivel, referidos al mínimo medido durante el periodo de control, se han comparado con los procedentes del mareógrafo de Santa Cruz del Norte (Figs. 11 y 12).

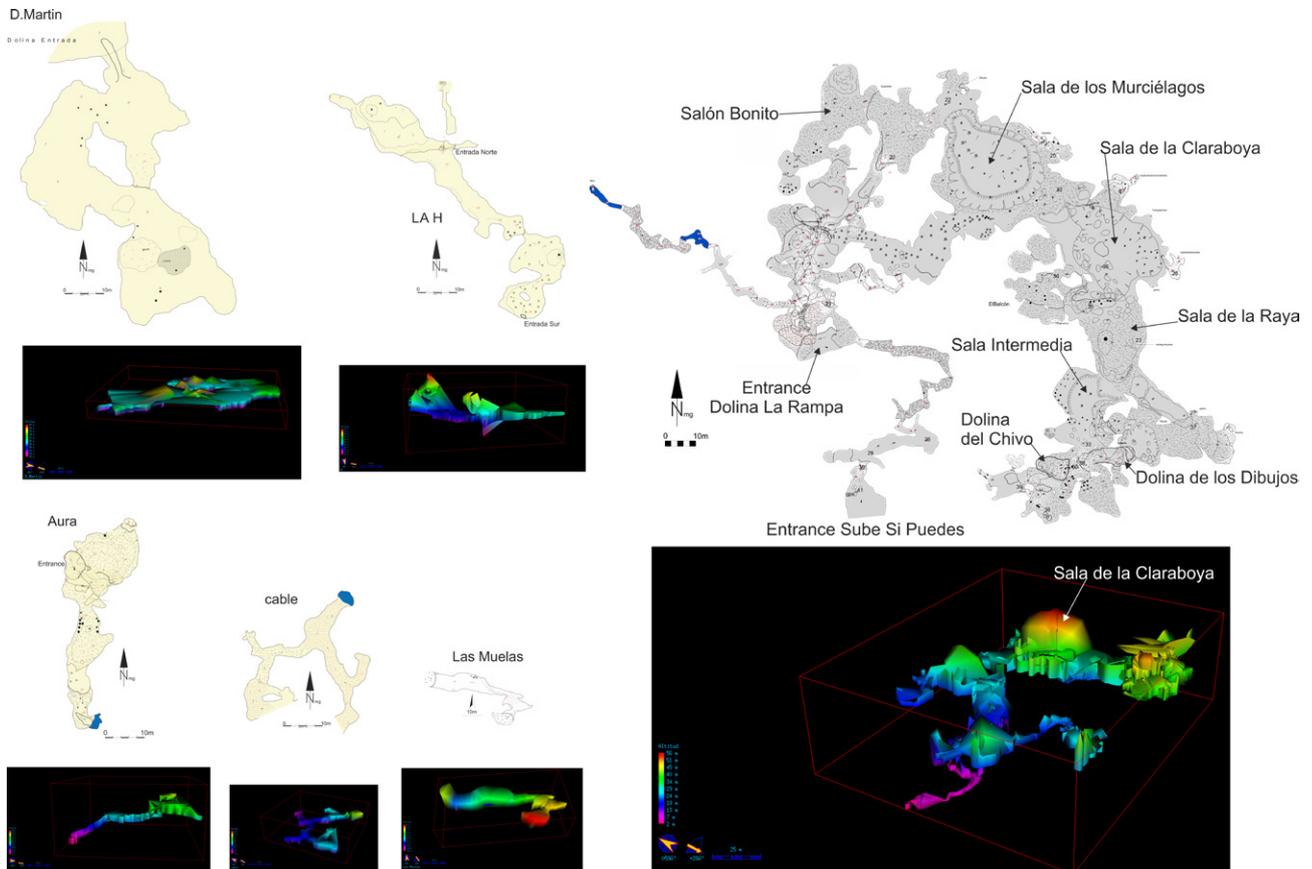


Fig. 7.- Mapa topográfico y modelo tridimensional de las cuevas de Don Martín, La H, El Aura, El Cable, Las Muelas y Cinco Cuevas.

Resultados de las distintas investigaciones realizadas

Características físico-químicas e isotópicas del agua subterránea

Las aguas analizadas presentan facies bicarbonatada-clorurada cálcico-sódica en las zonas inundadas de Cinco Cuevas y la Cueva de El Cable; en el manantial de Boca de Jaruco y en el Pozo de Marimar pasa a clorurada-bicarbonatada sódico-cálcica y a clorurada sódica en la zona saturada de la Cueva El Aura. Las aguas de goteo en Cinco Cuevas presentan facies clorurada-bicarbonatada o incluso clorurada-sulfatada cálcico-magnésica. Los valores medios de CE son de 2379 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pero con grandes variaciones, entre 585 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Cinco Cuevas y 7640 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la Cueva de El Aura, en función de la cercanía a la línea de costas. La T^a media es de 25,2°C valor acorde con la media anual, con el mínimo en 22,8°C en la zona semicolgada de Cinco Cuevas y el máximo en la Cueva de El Cable (27,8°C).

En general las aguas evolucionan desde bicarbonatadas a cloruradas y de cálcicas a sódicas en función del grado de mezcla con el agua de mar (Fig. 5A). La mayor variabilidad se observa en el Cl^- y en el Na^+ , pero también es elevada en el SO_4^{2-} , en el Mg^{2+} y en el K^+ , y la menor en el HCO_3^- y en el Ca^{2+} . Las variaciones del NO_3^- responden a unos procesos diferentes al resto de iones (Fig. 5B).

En cuanto a los isótopos estables, los valores se encuentran entre -4,4 y -3,2 (‰ V-SMOW) para el $\delta^{18}\text{O}$ y entre -22 y -13 (‰ V-SMOW) para el δD . En la zona inundada 2 de Cinco Cuevas y en la Cueva de El Cable aparecen los valores más ligero y más pesado respectivamente (Fig. 7).

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis en los que se incluyen la media de los valores del agua de lluvia analizados por Gutiérrez y Travieso (1974) para la Isla de Cuba.

Sorprendentemente, el agua de goteo muestreada en Cinco Cuevas en dos épocas diferentes, tiene unos valores en Cl^- , SO_4^{2-} y K^+ muy elevados, muy por encima del agua almacenada en la zona saturada de la misma cueva y en la cercana Cueva de El Cable. El valor del NO_3^- resulta ser el más elevado de los analizados, superior incluso al de la Cueva de El Cable, donde existen grandes acumulaciones

de guano relacionadas con las colonias de murciélagos que la habitan. El PO_4^{3-} solo aparece en las aguas de la Cueva de El Cable.

El diagrama de Piper de la figura 5A muestra una evolución del agua analizada en la zona saturada del acuífero desde Cinco Cuevas hasta El Aura que está en relación con la mezcla con agua de mar. El quimismo del agua de goteo tiene unos condicionantes físico-químicos diferentes, como ya se ha explicado.

La Tabla 2 muestra las relaciones entre los distintos parámetros medidos, que ponen de manifiesto la elevada correlación entre los indicadores de mezclas con agua de mar, como la CE, el Na^+ , Cl^- , K^+ , SO_4^{2-} o el Mg^{2+} . Se han marcado en negrita aquellas con un $r \geq 0,5$. Destacan la elevada correlación entre la CE con el Mg^{2+} , Na^+ y Cl^- y entre el Cl^- con el Mg^{2+} todos ellos indicadores de mezclas con aguas marina. También se observa una elevada correlación inversa entre la T^a y el pH y directa con el $\delta^{18}\text{O}$.

Del estudio de la relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ y el δD se observan tres agrupaciones de aguas. El grupo 1 estaría formado por el agua freática de las galerías más profundas de Cinco Cuevas, el grupo 2 por el agua de goteo y el agua semicolgada de las galerías profundas de Cinco Cuevas y por el Pozo y manantial muestreados en el entorno de la población de Boca de Jaruco. Finalmente, las aguas más pesadas forman parte del Grupo 3 y fueron muestreadas en la zona saturada de las cuevas de El Cable y El Aura.

Cartografía de las cavidades

En la figura 7 se observan las cartografías realizadas en las seis cavidades estudiadas. El desarrollo conjunto es de 2057 m con Cinco Cuevas como la de mayor extensión con diferencia (1375 m de desarrollo y 47 m de desnivel). La topografía de la Cueva del Cable es solo parcial debido a las dificultades para estudiar las zonas donde se encuentran las colonias de murciélagos que convierten el aire casi en irrespirable por la gran acumulación de guano y de materia orgánica, por la elevada temperatura y por los valores extremos de CO_2 en el aire. Estos valores fueron medidos por Otero-Collazo en 1989, como motivo de la elaboración de su “Tesis para categorización del Espeleólogo de Nivel Superior” pero no han sido publicados.

	T^a	CE	pH	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^2\text{H}$ [‰]	
T^a	°C	1	0,279	-0,815	0,242	0,511	0,491	0,313	0,251	0,363	0,389	0,243	0,707	0,628
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1	-3,60E-02	0,955	0,848	0,381	0,97	0,988	0,701	0,605	-0,306	0,488	0,377	
pH			1	3,30E-03	-0,21	-0,266	-7,80E-02	-6,70E-03	-0,114	-0,343	-0,128	-0,518	-0,488	
Na^+	mg/L			1	0,798	2,80E-02	0,797	0,975	0,447	0,407	-0,551	0,158	0,244	
K^+	mg/L				1	0,117	0,744	0,836	0,342	0,58	-0,115	0,773	0,696	
Ca^{2+}	mg/L					1	0,616	0,239	0,772	0,488	0,704	-0,242	0,1	
Mg^{2+}	mg/L						1	0,903	0,843	0,609	-4,30E-02	6,30E-02	0,268	
Cl^-	mg/L							1	0,587	0,47	-0,388	0,146	0,271	
SO_4^{2-}	mg/L								1	0,297	0,268	0,555	0,46	

Tabla 2. Matriz de correlación de los parámetros medidos en el agua subterránea. En negrita se resalta $r \leq -0,5$ y $r \geq 0,5$.

En general, las cuevas presentan un desarrollo horizontal en la parte superior, donde suelen desarrollarse grandes salas muchas veces con una claraboya abierta al exterior, como ocurre en Cinco Cuevas, Don Martín o Las Muelas. De las cuevas estudiadas, solo Cinco Cuevas, El Cable y El Aura progresan en profundidad hasta alcanzar el nivel freático del acuífero.

Caracterización de rellenos en Cinco Cuevas

La cartografía de depósitos pavimentarios realizada ha permitido diferenciar el orden estratigráfico de los rellenos que aparecen, divididos en los siguientes términos (Fig. 8): 1) niveles laminados de arcilla de decalcificación (*terra rossa*) y guano mezclados en diferentes proporciones; 2) rellenos de colapsos y caos de bloques; 3) costras carbonatadas pavimentarias; 4) arenas con marcas de corriente; 5) rellenos de espeleotemas; 6) derrubios; 7) conglomerados, gravas y brechas poco evolucionados.

Los 5 perfiles estudiados permiten deducir un orden de rellenos que comienza con los depósitos de *terra rossa* y guano en los que pueden aparecer bloques intercalados o

niveles de derrubios, a techo aparecen costras carbonatadas pavimentarias que pueden o no recubrir bloques de colapso. Sobre estos se desarrollan rellenos espeleotémicos formados por estalagmitas, columnas y coladas, fundamentalmente. Los bloques de colapsos también pueden aparecer directamente sobre los rellenos de *terra rossa* (Fig. 9).

Entre la Sala de la Raya y la galería que comunica con la dolina de los Dibujos se observa un cono de derrubios con el ápice en esta última que evoluciona hacia rellenos de *terra rossa* y guano hacia el interior de la cueva (Fig. 10).

En las zonas más profundas aparecen niveles de brechas y conglomerados canalizados, poco evolucionados que se relacionan con pequeños cauces que concentran el agua que penetra por las dolinas durante las eventuales tormentas tropicales que azotan la zona.

Monitorización del nivel piezométrico

En el sensor que se instaló, entre el 1 y 3 de marzo en la zona saturada más profunda de Cinco Cuevas y posteriormente en la Cueva de El Aura entre el 5 y el 8 de marzo, se detectan con claridad los mismos ciclos mareales registra-

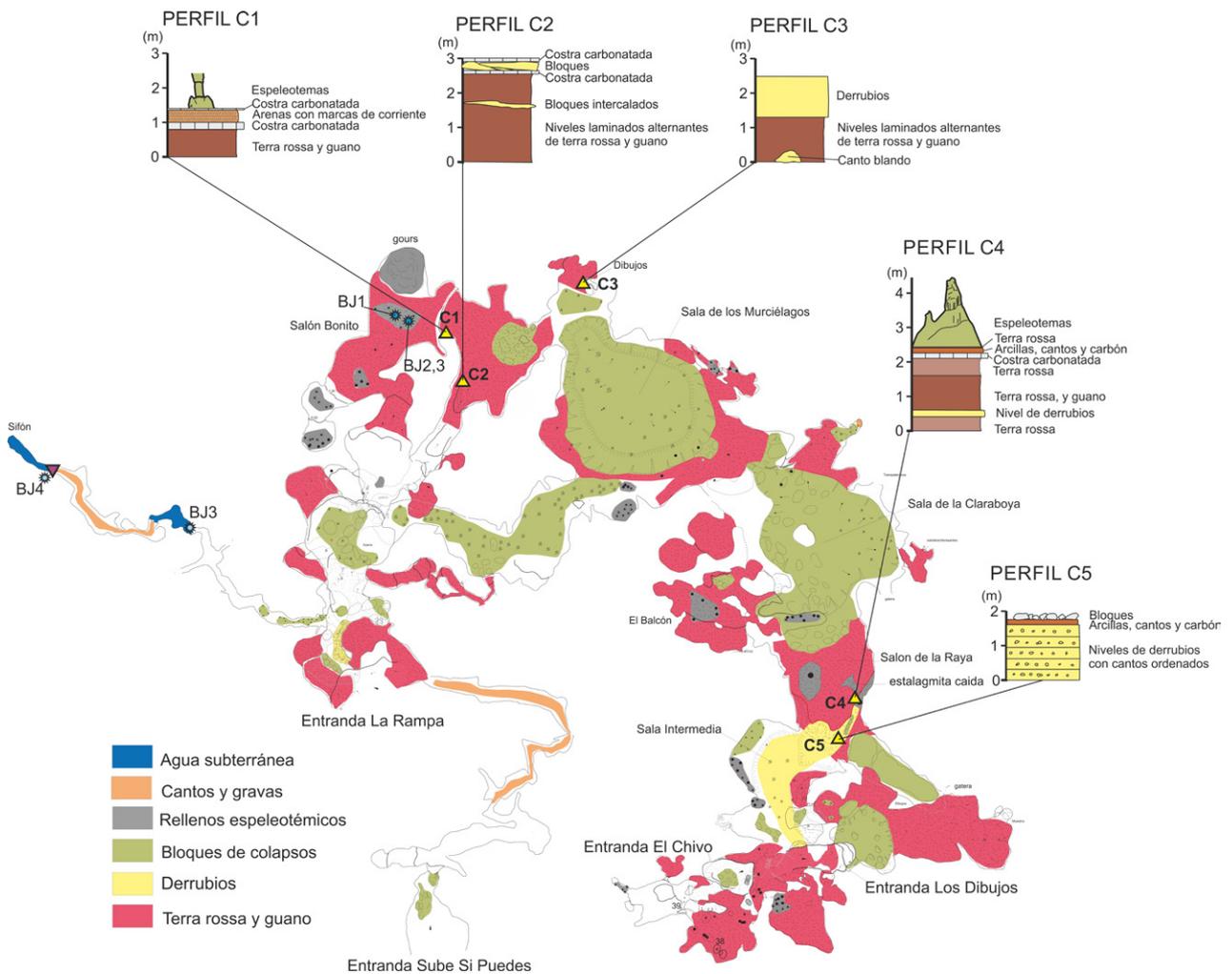


Fig. 8.- Cartografía de rellenos pavimentarios en cinco Cuevas con los cortes estratigráficos levantados (triángulos amarillos). Se incluye la localización de los puntos de agua muestreados y el punto donde se situó el sensor para medir la variación del nivel, la CE y la Tª del agua (triángulo invertido morado).



Fig. 9.- Niveles de *terra rossa* y guano afectados por bloques de colapso de los techos en Cinco Cuevas.

dos en el mareógrafo de Santa Cruz del Norte, a unos 7 km hacia el E de la zona de estudio. El punto monitorizado en Cinco Cuevas se encuentra a 1,72 km de la línea de costa y en la Cueva de El Aura a 0,71 km (Figs. 3B y 16).

En las dos cuevas se observan dos ciclos diarios de pleamar y bajamar con distinta amplitud al igual que ocurre en las tablas de mareas para las mismas fechas, si bien, lógicamente, con cierto desfase (Fig. 11). La amplitud de los ciclos disminuye con la distancia al mar, como es de esperar (p. ej., Rodés, 1925; Boop *et al.*, 2017). En la cueva del Aura es de unos 15 mm mientras que en Cinco cuevas de poco más de 10 mm.

Estas ciclicidades influyen también en los parámetros físico-químicos del agua, tanto en la T^a con en la CE (Fig. 12), la variación de la temperatura se observa mucho mejor en la Cueva de El Aura, con rangos de amplitud de casi 0,2°C, mientras que en Cinco Cuevas es 10 veces menor, mucho más sutil aunque también con la misma oscilación. En general, se observa en la T^a un desfase con respecto a la

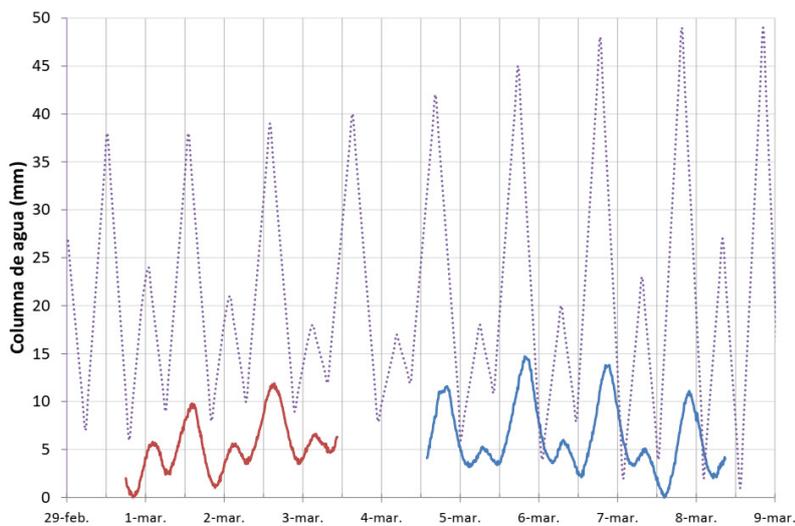


Fig. 11.- Variación temporal del nivel freático referido al mínimo registrado (valor 0) en la zona saturada de Cinco Cuevas (línea roja) y cueva de El Aura (línea azul) y su comparación de la evolución de la marea para las mismas fechas en el mareógrafo de Santa Cruz del Norte (línea de puntos).

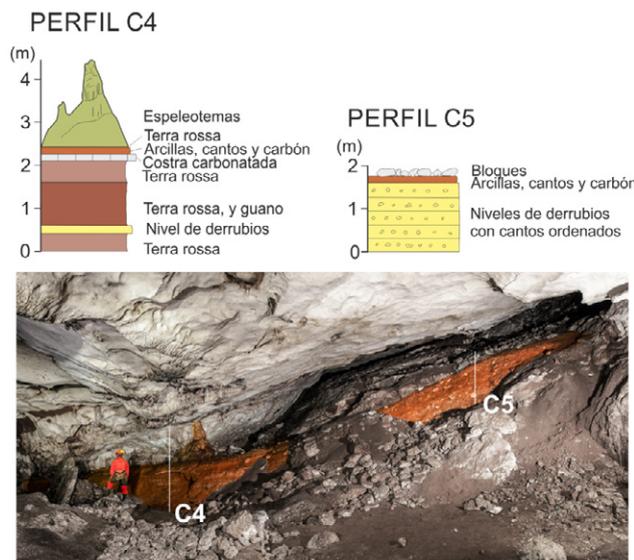


Fig. 10.- Perfiles realizados en la Sala de la Raya que muestran la evolución de la entrada de derrubios a la cavidad por una dolina (C5) hacia niveles laminados de *terra rossa* y guano (C4).

variación de la marea similar a lo que ocurre con el nivel. La influencia de la marea en la CE no se aprecia tan bien, pero existe. Curiosamente, a diferencia de la T^a, la variación de la CE se registra mejor en Cinco Cuevas que en la Cueva de El Aura, posiblemente debido a que la salinidad del agua es seis ordenes de magnitud menor en la primera, lo que permite más precisión en la medida del sensor pues el contraste es mayor. Aquí también se observa un desfase, pero bastante mayor que en el caso del nivel y la T^a.

Discusión

El mapa completo de Cinco Cuevas muestra una distribución de conductos que no encaja fácilmente con unas direcciones predeterminadas por la fracturación (Figs. 7 y 8).

Se observa una complejidad de galerías superpuestas con trazados laberínticos, fuertemente modificados por estructuras de colapsos que han generado espaciosas salas con morfología de cúpulas, como la Sala de la Claraboya (Fig. 8). Esta sala presenta en su cúspide una abertura que comunica con el exterior, abierta artificialmente hace varias décadas para facilitar la extracción de guano (Antonio Magaz, *com. pers.*). La extracción minera de guano, en su mayor parte mezclado con *terra rossa*, ha sido de gran importancia en esta cueva.

El conjunto de espeleotemas tiene un gran desarrollo en los niveles superiores de la cueva, especialmente en el Salón Bonito (Fig. 13B). Se trata de una o varias generaciones fósiles que no están en crecimiento actualmente. Los espeleotemas activos de edad reciente son escasos y de poco volumen. En algunas zonas, las

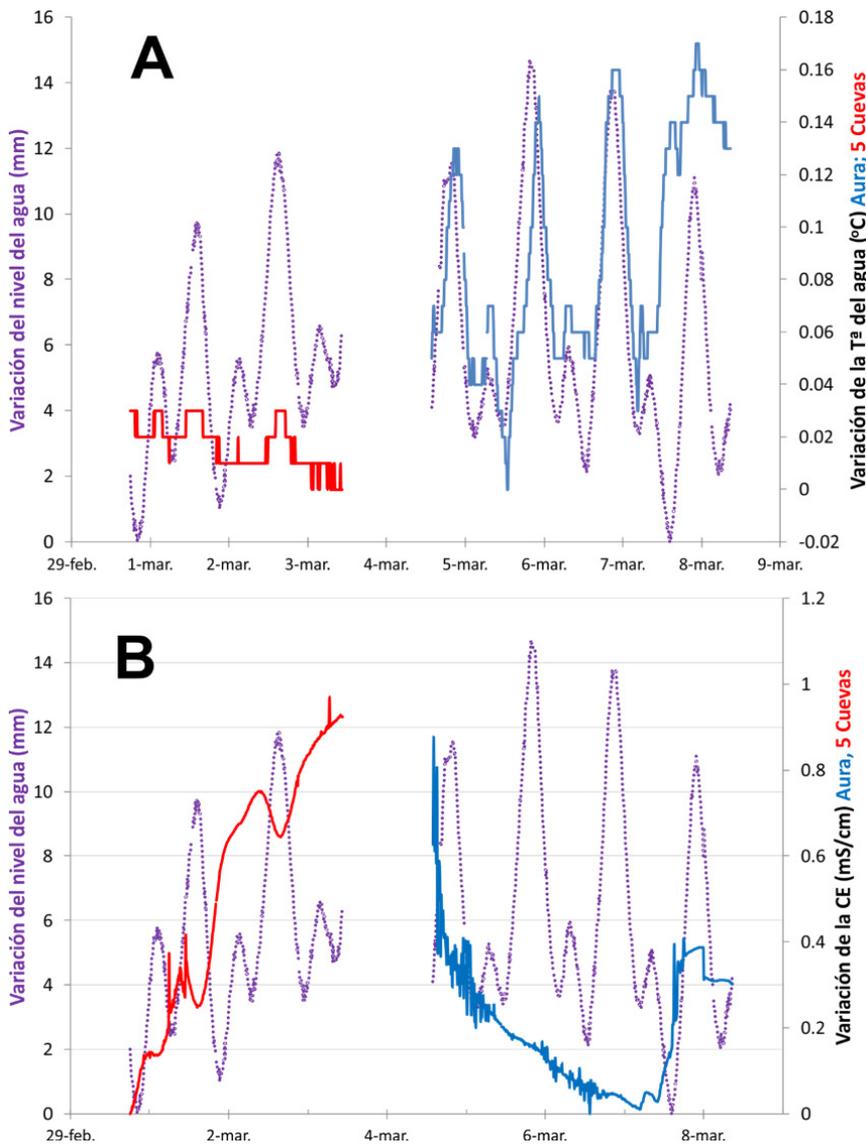


Fig. 12.- Variación temporal de la Tª (A) y CE (B) en la zona saturada de Cinco Cuevas (línea roja) y Cueva del Aura (línea azul) referidos a los mínimos registrados (valor 0) y su comparación con la evolución de la marea para las mismas fechas en el mareógrafo de Santa Cruz del Norte (línea de puntos).

costras carbonatadas aparecen parcialmente descalzadas por desaparición de parte del relleno de *terra rossa* sobre el que se sustentan, lo que ha generado roturas en el pavimento y en las estalagmitas y columnas que se le superponen (Fig. 13A).

Donde las paredes y techos no han sido modificados por colapsos ni por recubrimientos de espeleotemas, se observan morfologías de disolución congruentes con procesos de condensación-corrosión en presencia de CO₂ en la atmósfera de la cueva (Sarbu y Lascu, 1997; Audra *et al.*, 2007; De Waelle y Gutiérrez, 2022, entre otros). Estos procesos debieron ser muy activos en un momento determinado de la historia geológica de la cavidad y son los responsables del relleno de *terra rossa*, que es especialmente importante en la zona superior de la cavidad. Estas secuencias de relleno también aparecen en otras cavidades estudiadas en la zona, como en las cuevas del Aura, El Vaho, en La H, Las Muelas y Don Martín, entre otras.

En Cinco Cuevas se observan varios niveles de cavernamiento que Magaz, (2021) relaciona con sucesivas posiciones del nivel del mar asociados al desarrollo de terrazas marinas. En el conjunto de cuevas topografiadas se pueden diferenciar bien dos partes: una parte superior, caracterizada por la presencia de galerías laberínticas, grandes salas con estructuras de colapsos y secuencias de rellenos de *terra rossa* recubiertas

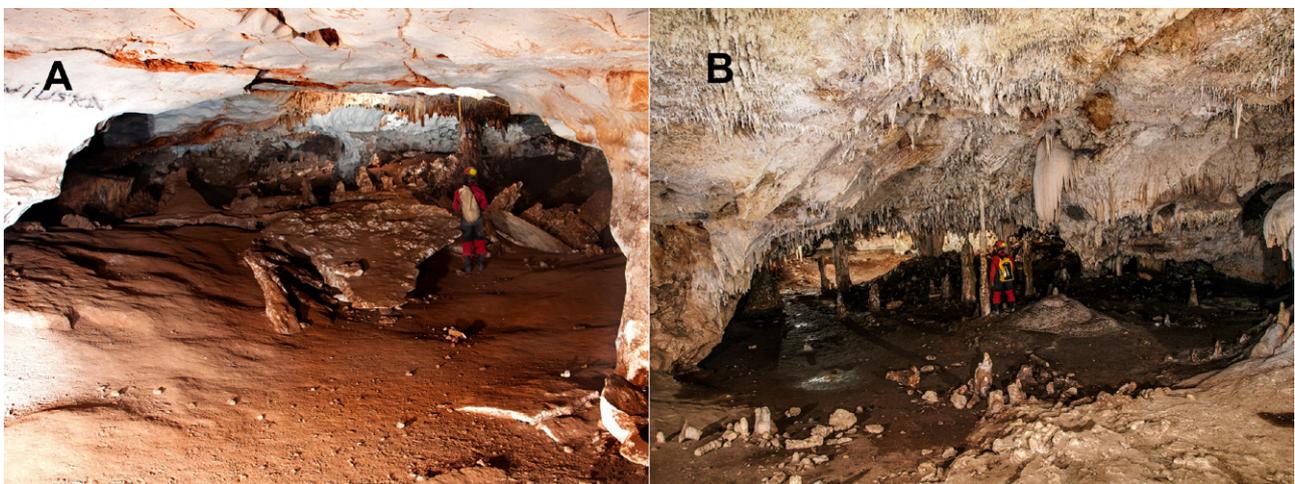


Fig. 13.- A) Costras pavimentarias y espeleotemas rotos por desaparición del relleno de *terra rossa* sobre el que se asientan. B) Rellenos de espeleotemas en el Salón Bonito, Cinco Cuevas.

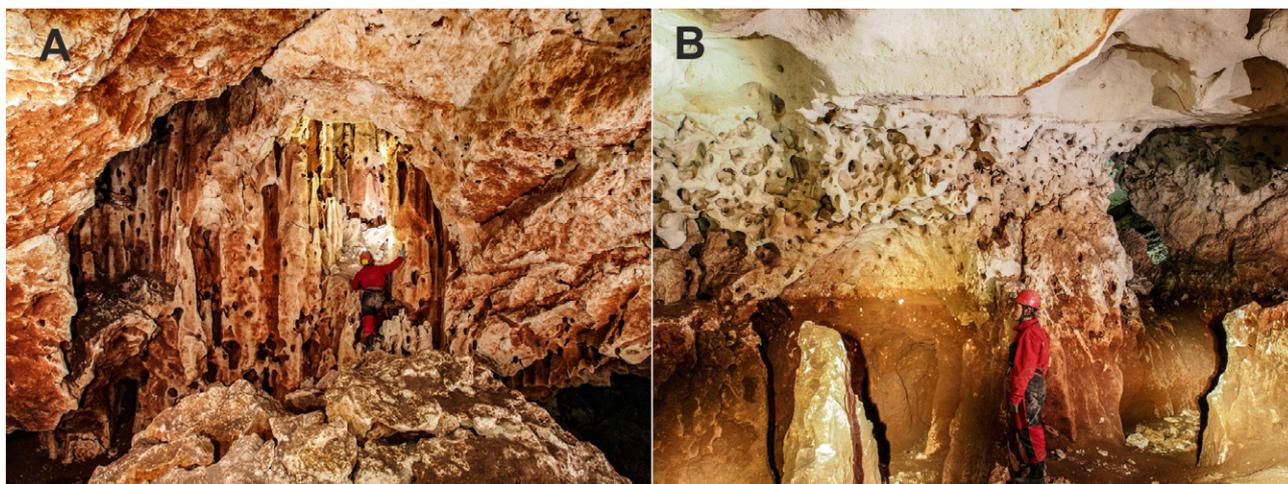


Fig. 14.- Morfologías de corrosión en las paredes de la zona más profunda de Cinco Cuevas. En A) se observa un lapiaz subterráneo en las paredes y *solution pockets*, B) en la parte inferior un nivel lavado que estuvo en otro tiempo de relleno de *terra rossa*, por encima de él destaca un nivel corroído con *solution pockets* y en la parte superior un nivel de cúpulas de corrosión subaéreas.

por espeleotemas y una parte inferior que aparece a partir de 20 m s.n.m. En esta segunda zona no hay rellenos espeleotémicos ni arcillosos, o han desaparecido por erosión y lavado (Fig. 14B), y las paredes solo están modificadas por morfologías corrosivas generadas en medio subaéreo similares a las descritas por Palmer (1991) (acanaladuras, *solution pocket* y cúpulas fundamentalmente) (Figs. 14A y B). La galería más profunda aparece semi-inundada con un pequeño relleno de cantos angulosos removilizados y sin marcas de corrientes en las paredes. Esta galería presenta un perfil ovalado característico de cavidades freáticas. El nivel de inundación aparece a 2 m s.n.m. y la información aportada por los sensores ha demostrado que corresponde al nivel piezométrico del acuífero en conexión directa con el mar.

De las cavidades estudiadas, sólo Don Martín y Las Muelas, se encuentran sobre la cota 20 m s.n.m. (Fig. 15), el resto alcanza profundidades cercanas al nivel piezométrico o, directamente, llegan a cortarlo.

Los datos aportados por el sensor instalado en Cinco Cuevas y posteriormente en la Cueva de El Aura, demuestran que la influencia de las mareas afecta en la actualidad prácticamente a toda la zona saturada del acuífero (Fig. 16), al menos desde la zona donde se encuentra Cinco Cuevas, a 1,72 km de distancia de la costa. Esta influencia, además, afecta tanto a la T^a del agua como a la CE (Fig. 12). Los análisis de aguas realizados, también muestran una evolución del quimismo desde aguas bicarbonatadas a cloruradas y de

cálcicas a sódicas, que es función de grado de mezcla con el agua de mar. La anómala T^a registrada en la cueva de El Cable (27,8°C ver Tabla 1) podría estar condicionada por la elevada temperatura de la atmósfera de la cueva debido a la influencia del calor desprendido por la enorme colonia de murciélagos que la habita permanentemente.

El valor del Cl^- puede utilizarse para calcular el porcentaje de mezcla con el agua del mar en cada muestra, para ello se ha considerado un valor de 19500 mg/l de Cl^- como agua de mar (Fagundo *et al.*, 1999) y el valor del Cl^- del agua de lluvia, como aguas autógenas sin ninguna mezcla con el mar, si bien esto no es del todo cierto pues hay una concentración del Cl^- en el suelo por evaporación. El cálculo se ha realizado a partir de las concentraciones de Cl^- (Fagundo *et al.*, 1999):

$$x = \frac{[Cl^-]_{muestra} - [Cl^-]_{agua\ dulce}}{[Cl^-]_{agua\ de\ mar}} \cdot 100$$

Los resultados de este cálculo se han incluido en la figura 17. En el agua de las galerías inferiores de Cinco Cuevas la mezcla con agua de mar es muy débil, de tan solo un 0,2% en la muestra BJ4, este porcentaje se duplica en la Cueva del Cable y ya es de más del 10% en la Cueva del Aura.

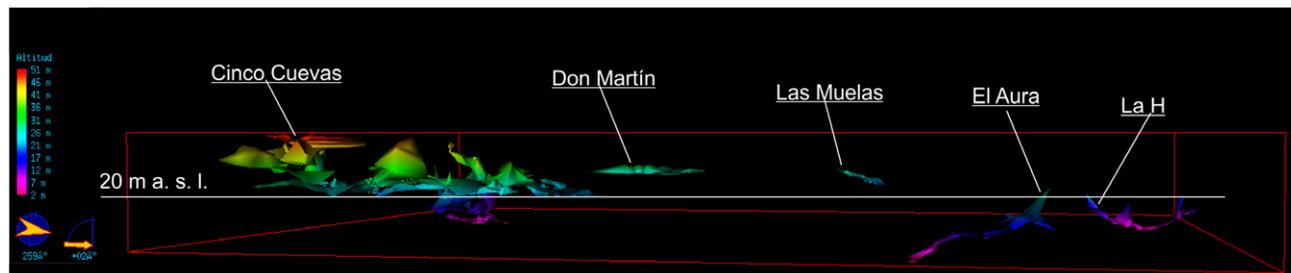


Fig. 15.- Modelo 3D del conjunto de cavidades topografiadas. La cota 20 m marca el nivel que diferencia dos zonas principales de cavernamiento, posiblemente de distintas edades. La escala horizontal ha sido modificada para poder comparar las cotas de las diferentes cavidades.

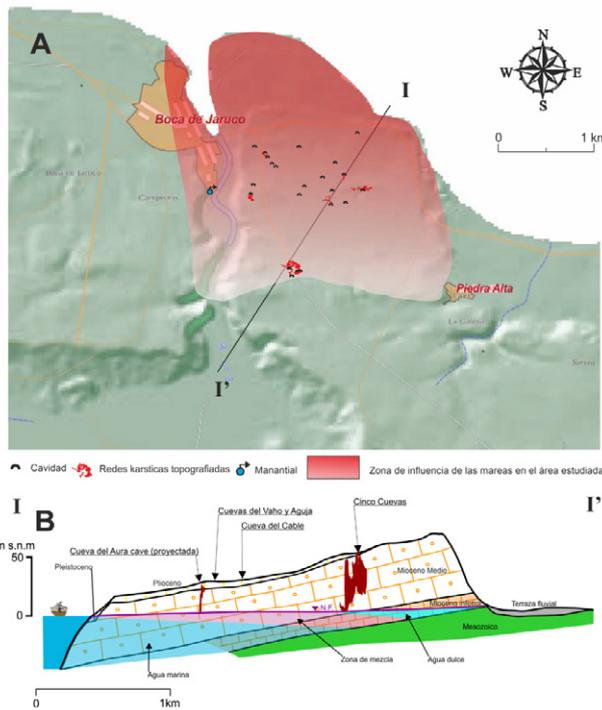


Fig. 16.- A) Extensión del área afectada por las oscilaciones mareales en la zona de estudio. B) Corte hidrogeológico del acuífero de Boca de Jaruco, la línea negra en A) y en la Fig. 2 indica su localización.

En todo caso, esos datos indican que la influencia del agua de mar penetra hasta casi 2 km tierra adentro en el acuífero de Boca de Jaruco, tal y como se puede apreciar en la figura 16b. Este hecho fue plenamente confirmado por los datos aportados por el sensor colocado en Cinco Cuevas y la Cueva del Aura. El sensor mostró claramente la influencia de las mareas en el nivel freático de las zonas inundadas más profundas con un registro que reproduce las ondas mareales registradas en el mareógrafo de Santa Cruz, con una onda de mayor amplitud en función de su cercanía al mar (Fig. 11). Además, los registros obtenidos pusieron de manifiesto que las ondas mareales también afectan a los valores de T^a y CE en el agua almacenada en

el acuífero cortada por las dos cavidades.

La línea isotópica de mezclas de aguas dulces infiltradas en el acuífero y el agua de mar, puede deducirse a partir de los datos obtenidos en las cuevas y de los valores isotópicos del agua de mar en el Caribe tomados por Gonfiantini y Simonot (1987) en las aguas superficiales marinas de Haití (Fig. 18). También se han usado los valores obtenidos en aguas ecuatoriales por Craig and Gordon (1965). La recta de intrusión marina presenta un ajuste con R²= 0,99 con la que se obtiene la ecuación: $y = 5,39x + 2,144$ si bien, no se observa un desajuste entre las aguas muestreadas en el acuífero con la línea meteórica para la Isla de Cuba.

Llama la atención los elevados valores en Cl⁻, Na⁺ y NO₃⁻ que se registran en las aguas de goteo muestreadas en Cinco Cuevas (Tabla 1). Una posible explicación de los primeros podría ser la concentración de sales en el suelo procedente de aerosoles de origen marino que podrían ser alimentados durante los ciclones o los huracanes, pero esta cuestión necesita una investigación más profunda que permita confirmar esta hipótesis, ya que los valores que se observan son demasiado elevados (entre 330 y 390 mg/l).

Los valores de NO₃⁻ están entre 64 y 85 mg/l. Estos valores podrían ser normales si el agua de precipitación se ha infiltrado en suelos contaminados por actividades agrícolas o ganaderas. Sin embargo, sobre la superficie del acuífero no existen actualmente actividades de este tipo, aunque si hay una cobertura vegetal de matorral sobre el suelo del lapiaz y arbórea en las dolinas rellenas de *terra rossa*. Las observaciones realizadas en la mayoría de las cuevas indican que existen depósitos generalizados de *terra rossa* relleno de huecos, casi siempre mezclados en grandes proporciones con guano (Fig. 19). Aquí podría estar la explicación de estos elevados valores del nitrato si el agua infiltrada desde superficie entra en contacto con alguno de estos rellenos, que la retienen y la drenan lentamente alimentando las aguas de goteo en las estalactitas, ya cargadas de NO₃⁻ procedente de la descomposición del guano y en menor medida de la descomposición de la materia orgánica que crece en la superficie.

Existen numerosos trabajos que ponen de manifiesto los procesos de karstificación en acuíferos carbonatados

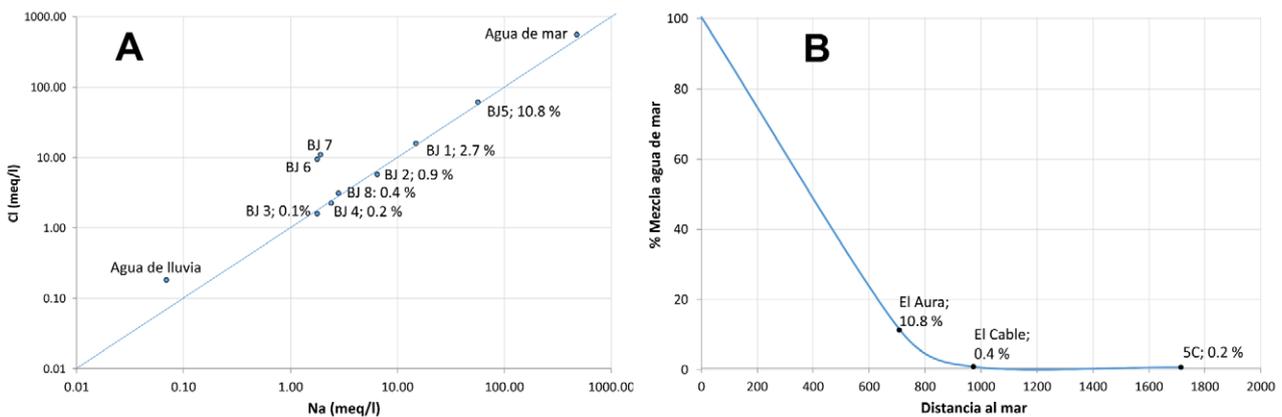


Fig. 17.- A) Relación, en ejes logarítmicos, entre el Cl⁻ y Na⁺ en el agua muestreada en Boca de Jaruco y su comparación con la media del agua de lluvia (Moleiro *et al.*, 2002) y el agua de mar (Fagundo *et al.*, 2009) B) Porcentaje de agua de mezcla vs distancia al mar en las tres cuevas muestreadas.

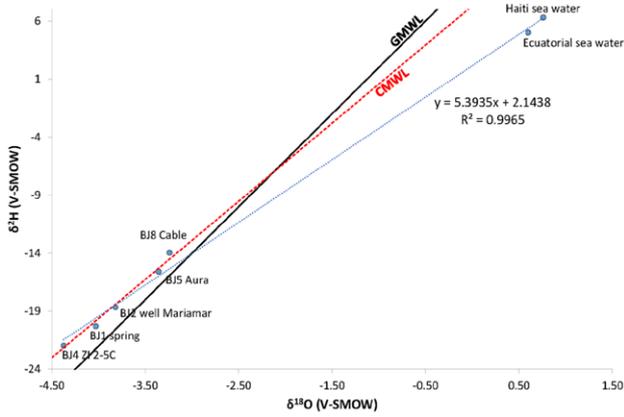


Fig. 18.- Línea de mezcla entre el agua de mar en el Caribe (Craig y Gordon, 1965; Gonfiantini y Simonot, 1987) y el agua dulce almacenada en el acuífero de Boca de Jaruco obtenida a partir de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{D}$ de las aguas muestreadas. La línea negra corresponde a la Línea Meteorológica Mundial (GMWL; Craig, 1961) y la roja a la Línea Meteorológica de Cuba (CMWL; Molerio-León, 1992).

como consecuencia de mezclas de aguas de diferente salinidad (p.ej., Palmer and Williams, 1984; Back *et al.*, 1986; Mylroie y Cariew, 1990; Fagundo *et al.*, 1999; Palmer, 2007; Mylroie, 2013; y muchos otros). La disolución de los carbonatos se produce por una conjunción de fenómenos tales como la disolución incongruente de minerales por efecto de ion común, cambios en el pH, incremento de la solubilidad por efecto salino o fuerza iónica, incremento de la corrosión por mezcla de aguas (Appelo y Postma, 1993; Fagundo, 1996; Fratesi, 2013).

Los datos obtenidos ponen de manifiesto que actualmente los procesos de mezclas de aguas marinas y continentales afectan a la mayor parte del acuífero y podrían estar provocando una intensa karstificación en la zona saturada del acuífero, especialmente en la zona de mezcla (Fig. 16). Estos mismos procesos debieron ocurrir en el pasado a cotas más elevadas, y son la causa principal del elevado volumen de huecos existente actualmente que ha podido ser explorado y cartografiado.



Fig. 19.- Rellenos de *terra rossa* y guano en Cinco Cuevas. Perfil C2 en la Fig. 8.

Conclusiones

A partir de las observaciones realizadas se pueden deducir una serie de etapas que describen la evolución espeleogenética del conjunto de cavidades: 1) Un primer episodio de generación de huecos en un medio saturado posiblemente durante el Pleistoceno inferior o finales del Plioceno. Este episodio debió ocurrir con una parte del afloramiento emergido (superficie S3 en la figura 3b). Esto favoreció la mezcla de agua dulce-salada que generó las protocuevas. 2) Un descenso en el nivel freático (¿levantamiento tectónico?) que deja los huecos generados anteriormente, al menos parcialmente, fuera del agua. 3) Nueva generación de huecos en medio saturado por debajo de la cota 20 m, acompañado por un intenso proceso de corrosión subaéreo, que probablemente originó un importante relleno de arcillas de disolución residuales (*terra rossa*) en la zona superior de la cueva y morfologías en paredes y techos causadas por condensación-corrosión. Este proceso pudo repetirse varias veces en relación con los movimientos glacioeustáticos a partir del Pleistoceno medio. 4) Derrumbes generalizados que agrandan los huecos con la formación de las grandes salas en Cinco Cuevas y en otras cuevas, que contribuyen a la apertura o ensanchamiento de las comunicaciones con el exterior. 5) Finalmente, se observan fases especialmente húmedas que generan un gran crecimiento de espeleotemas en las zonas más elevadas de las cuevas y que recubren tanto los bloques colapsados como los rellenos de *terra rossa*.

En todos estos procesos, la generación inicial de huecos ha tenido que producirse en la zona de mezcla de agua dulce y agua salada (zona de interfase), que puede adentrarse más de 1,7 km desde la línea de costa, tal y como los datos obtenidos en este trabajo han demostrado. Tras el descenso en el nivel piezométrico, los huecos formados por disolución química en la zona freática son agrandados en medio subaéreo (¿durante los periodos fríos?) por condensación-corrosión. El residuo de estos procesos generaría los rellenos de arcillas de decalcificación. El progresivo crecimiento de los huecos desequilibra algunas zonas de la cavidad con colapsos de los techos. Durante las etapas cálidas y húmedas del Pleistoceno medio y, especialmente, del Pleistoceno superior debió producirse el relleno de espeleotemas que recubre tanto los colapsos como los rellenos de *terra rossa*. En una etapa final se produciría la ruptura de espeleotemas, posiblemente por erosión y lavado de los niveles de arcillas sobre los que se depositaron y/o por asentamiento del suelo debido a hundimientos en los niveles inferiores, sin descartar la contribución que la sismicidad ha podido tener, tal y como apunta Molerio-León (2018).

Agradecimientos y financiación

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco de la colaboración entre los grupos de espeleología Ciro Berrios y Martel de la Sociedad Espeleológica Cubana, la Sociedad de Ciencias Espeleológicas Alfonso Antxia y la Asocia-

ción Espeleológica Velezana, con la colaboración de Inversiones Gamma S.A. y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Agradecemos las correcciones realizadas por los dos revisores, que han contribuido a una mejora significativa del documento.

Contribución de los autores

El texto del artículo ha sido escrito por AGR con la colaboración de VOC y LML. Las topografías y exploración de las cavidades han sido elaboradas por VOC con la ayuda de campo de MAM y OCB. Los muestreos, levantamiento de cortes y colocación y descarga de sensores han sido realizados por AGR con la colaboración de MAM, VOC y OCB. La coordinación de los trabajos fue realizada por VOC con la colaboración de AGR y LML.

Referencias

- Acevedo-González, M., 1967. Estudio espeleológico de la cueva el Vaho o Bao. Boca de Jaruco. Habana. Rev. Serie Ciencias Biológicas. Fasc. 1. Vol. 1, n° 5. J.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 1993. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Balkema, Rotterdam, 536 p.
- Audra, P., Hoblea, F., Bigot, J.Y., Nobecort, J.C. 2007. The Role of Condensation Corrosion in Thermal Speleogenesis. Study of a Hypogenic Sulfidic cVe in Aix-les-Bains, France. *Acta carsologica*, 36(2): 185-194. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i2.186>
- Back, W., Hanshaw, B.B., Herman, J.S., Van Driel, J.N., 1986. Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico. *Geology*, 14(2): 137-140. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<137:DDO-APR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<137:DDO-APR>2.0.CO;2)
- Bogli, A., 1964. Mischungskorrosion-Ein Beitrag Zum Verkarstungsproblem: *Erdkunde*, 18: 83-92. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.1964.02.02>
- Boop, L.M., Wynn, J.G., Thompson, G., Fornos, J.J., Onac, B.P., 2017. Interactions between surface conditions, the Mediterranean Sea, and cave climate within two littoral caves in Mallorca: implications for the formation of phreatic overgrowths on speleothems. *Journal of Cave & Karst Studies*, 79(1): 59-72. <https://doi.org/10.4311/2016ES0114>
- Chappell, J., 2002. Sea level changes forced ice breakouts in the Last Glacial cycle: new results from coral terraces. *Quaternary Science Reviews*, 21: 1229-1240. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00141-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00141-X)
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Craig, H., Gordon L.I., 1965. Deuterium and Oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: Tangiorgi, E. (ed): *Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures* - Vienna: IAEA, 130.
- De Albear, J.F., Iturralde Vinent, M., 1978. Estratigrafía de la provincia de La Habana. En: *Contribución a la geología de las provincias de La Habana y ciudad de La Habana*. Instituto de Geología y Paleontología. Academia de Ciencias de Cuba. 12-54.
- De Waele, J., D'Angeli, I.M., Bontognali, T., Tuccimei, P., Scholz, D., Jochum, K.P., Columbu, A., Bernasconi, S.M., Fornos, J.J., Grau González, E.R., Tisato, N., 2018. Speleothems in a north Cuban cave register sea-level changes and Pleistocene uplift rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(11): 2313-2326. <https://doi.org/10.1002/esp.4393>
- Ducloz C., 1963. Etude géomorphologique de la région de Matanzas, Cuba. *Archives des Sciences Genève*, 16: 351-422.
- Fagundo, J.R., 1996. Química del Agua Kárstica. En: *Hydroquímica del Karst*. J.R. Fagundo, J.E. Rodríguez, J.J. Valdés, Universidad de Granada, 13-124.
- Fagundo, J.R., González, P., Jiménez, S., Benítez, G., Ferrera, V., Ramírez, J., González, A., Romero, E., Orihuela, D., Ramírez, J., Suárez, M., 1999. Metodología para la caracterización geoquímica de los acuíferos cársicos costeros II. Identificación de los procesos de mezcla y modificación de las facies hidroquímicas. En: *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*. Ed. ISCTN (CITMA), 182-191.
- Fratesi, B., 2013. Hydrology and geochemistry of the freshwater lens in coastal karst. In: *Coastal karst landforms*, 59-75. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5016-6_3
- Gonfiantini, R., Simonot, M., 1987. Isotopic investigations of groundwater in the cul-de-Sac Plain, Haiti. *Proc. Symp. Isotope Tech. in Water Resources Development*, Vienna: IAEA, 506.
- Iturralde-Vinent, M., 1985. Algunos aspectos geomorfológicos del territorio de las provincias de La Habana. En: *Contribución a la geología de las provincias de La Habana y ciudad de La Habana*. Instituto de Geología y Paleontología. Academia de Ciencias de Cuba, 5-11.
- Lundberg, J., 2013. Microsculpturing of solutional rocky landforms. In: Shroder, J. (Ed.-in-chief) and Frumkin, A. (Vol. Ed.), *Treatise in Geomorphology*, 6: 121-138. Elsevier, Academic Press, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00129-9>
- Magaz, A.R., 2017. *Geomorfología de Cuba*. Amazon Books, Kindle editions. 377 p.
- Magaz, A.R., 2021. Morfoestructuras. Las vías principales para su identificación y caracterización. *Cuba Geográfica. Cuadernos de Geomorfología de Cuba*: 1-32.
- Myrloie, J.E., 2013. Coastal karst development in carbonate rocks. In: *Coastal karst landforms*, 77-109. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5016-6_4
- Myrloie, J.E., Carew, J.L., 1990. The flank margin model for dissolution cave development in carbonate platforms. *Earth surface processes and landforms*, 15(5): 413-424. <https://doi.org/10.1002/esp.3290150505>
- Molerio-León, L.F., 1992. Composición Química e Isotópica de las Aguas de Lluvia de Cuba. II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba, 20-21.
- Molerio-León, L.F., 2013. Evidencias de carsificación y cavernamiento mixto epi-hipogénico en la Cobertura Neoaútoctona de la Franja de Crudos Pesados del Norte de La Habana-Matanzas. *Mapping Latino*, 2.
- Molerio-León, L.F., 2018. Cronoestratigrafía relativa de eventos paleosísmicos en el tercio inferior del Río Jaruco, Cuba occidental. *Gota a Gota*, 15: 93-96.
- Muhs, D.R., Schweig, E.S., Simmons, K.R., Halley, R.B., 2017. Late Quaternary uplift along the North America-Caribbean plate boundary: Evidence from the sea level record of Guantanamo Bay, Cuba. *Quaternary Science Reviews*, 178: 54-76. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.024>
- Otero-Collazo, V., Zaldivar-Chateloin, B., 1986. Notas preliminares geoespeleológicas de Boca de Jaruco. 2da Jornada Científica Provincial. Ciudad de La Habana.
- Otero-Collazo, V., González-Ramón, A., Molerio-León, L., Chaves-Bonora, O., Alonso-Martínez, M., 2021. Sobre la espeleogénesis de las cavidades de Boca de Jaruco. Mayabeque-Cuba. Primeros resultados de las campañas de 2019-2020. *Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst*, 16: 6-15.

- Palmer, A., 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geol Soc. Am. Bulletin*, 103(1): 1-21. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2)
- Palmer, A.N., 2007. *Cave geology*. Cave Books, Dayton.
- Palmer, R., Williams, D., 1984. Cave development under Andros Island, Bahamas: *Cave Science*, 11(1): 50-52.
- Rodés, L., 1925. Los cambios de nivel en las cuevas del Drach (Manacor, Mallorca) y su oscilación rítmica de 40 minutos. *Memorias de la Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, 19 (7): 207-221.
- Sarbu, S.M., Lascu, C., 1997. Condensation corrosion in Movile cave, Romania. *Journal of Cave and Karst Studies*, 59 (3): 99-102, Huntsville.
- MANUSCRITO RECIBIDO: 24-07-2023
REVISIÓN RECIBIDA: 20-10-2023
ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 31-10-2023