

Sobre algunos principios fundamentales de morfología e hidrología cárstica *

POR

N. LLOPIS LLADO

INTRODUCCION

Los conocimientos que comenzamos a tener sobre Geoespeleología nos obligan a sistematizar los fenómenos cársticos subterráneos, y sobre todo a precisar algunos puntos que parecen fundamentales para comprender claramente la evolución geológica del mundo subterráneo. Muchos de estos principios han sido esbozados o expuestos ya en monografías morfológicas sobre regiones cársticas; pero muchos otros son desconocidos, o a lo más admitidos implícitamente por los espeleólogos y morfólogos del Karst, sin haberse ensayado nunca su análisis y sistematización.

Este estado de cosas no puede continuar si se quieren comprender a fondo una serie de fenómenos que se suceden en la evolución cárstica y que son de la mayor importancia morfológi-

* Este trabajo fué publicado en ESTUDIOS GEOGRAFICOS, año XI, número 41, págs. 643-679, siéndonos grato dar las gracias a la Dirección de esta Revista, por habernos permitido la reimpresión.

ca e hidrológica. Por todo esto me ha parecido conveniente establecer algunos principios que pueden servir de punto de partida o de planteo de problemas para intentar esclarecer algunos conceptos fundamentales de la evolución cárstica en su sentido más amplio, es decir, superficial y subterráneo.

Muchos de estos principios han permanecido desconocidos a consecuencia de que el estudio de los fenómenos cársticos ha estado, y aun hoy, por desgracia, sigue estando, partido en dos hemisferios sin conexión alguna; la morfología cárstica superficial es del dominio de los morfólogos y de los geólogos; el conocimiento de las cavernas es exclusividad de los espeleólogos, que muchas veces, sin la preparación teórica necesaria, emiten conceptos que precisan revisiones severas. Estas circunstancias hacen que la evolución cárstica nos sea sólo parcialmente conocida y que ignoremos la mayor parte de las leyes que la condicionan, de tal modo que, a pesar de las recientes investigaciones y descubrimientos sobre la génesis de las cavernas y sobre el Karst políciclico (1) (8) (9) (13) (15) (20) (31) (40) (41) (42), la hidrología cárstica apenas si está algo más adelantado que en los tiempos de Cvijic y de Martel, siendo las ideas de aquellos autores las que prevalecen todavía en los tratados de Geografía física y Morfología.

Estas consideraciones justifican la audacia de estas líneas, que sólo pretenden esbozar algunos conceptos entresacados de multitud de observaciones acumuladas durante cerca de veinte años recorriendo macizos calizos de regímenes climáticos diferentes. Las observaciones se refieren a zonas cársticas mediterráneas españolas (Karst catalán y valenciano), al Pirineo, tanto español como francés; a los macizos calizos de Andalucía (sierras de Cabra y Priego, sierra Harana, sierra de Baza), a las montañas vascas y astures, a las Causse del Macizo Central francés y a la zona prealpina francesa (Vercors, Dévoluy, Grande Chartreuse). Así, pues, la dispersión horizontal y vertical de las observaciones permite darles tal vez un valor general.

I. EL CICLO CARSTICO Y EL CICLO DE EROSION NORMAL

La noción de ciclo cárstico fué dada hace ya mucho tiempo por la mayoría de los autores que se ocuparon del Karst. A este respecto el nombre de Cvijic (6) (7) (9) (14) debe ir a la cabeza de todos los morfólogos. Por lo tanto, la evolución subterránea, tan magistralmente esbozada por Martel (34) (35) (36) (37) en sus incontables obras, no es más que una parte del ciclo cárstico, que a su vez está estrechamente ligado al ciclo de erosión normal. Por esto Martel, en una de sus últimas obras (36), hablando de las simas, dice «que parece absolutamente necesario hacer intervenir estas simas en las discusiones sobre la denudación y la morfología terrestres, como factores comparativos de estudio, del mismo modo que las terrazas, la sobreexcavación, los escalones de confluencia, las antiguas morrenas...».

Y, en efecto, de la misma manera que es imposible comprender la evolución hidrogeológica de una caverna sin conocer la anatomía y la fisiología del aparato cárstico, del que no es sino una pequeña parte, es igualmente imposible para conocer a fondo el ciclo cárstico dejar de lado las características morfológicas y estructurales de lo que puede llamarse *relieve precárstico*, es decir, el relieve que ha precedido a una carstificación determinada.

En efecto; este relieve precárstico tiene una influencia decisiva en las formas superficiales y subterráneas que derivan de una carstificación, y en ciertos casos puede suministrar importantes datos para el difícil problema de la edad de las carstificaciones.

Ante todo es necesario ensayar una sistemática de aparatos cársticos en relación con este relieve precárstico. A mi modo de ver, podrían dividirse en los siguientes tipos:

1. *Karst de llanura:*
 - a) *Karst de mesa.*
 - b) *Karst de penillanura.*
 - c) *Karst de relieve policíclico.*

2. *Karst de montaña:*

- a) *Karst de cuevas.*
- b) *Karst de pliegues.*
- c) *Karst de fallas.*

3. *Karst híbrido.*

Karst de llanura.—El Karst de llanura se caracteriza por tener todas las formas superficiales dispuestas al mismo nivel o regularmente escalonadas sobre las hombreas de erosión en el caso particular y más complejo del Karst instalado sobre relieves policíclicos.

El tipo más sencillo es el *Karst de mesa*, en el cual las diaclasas desempeñan el principal papel, tanto en la génesis de las formas de absorción (dolinas, uvalas y poljés) como en las formas subterráneas. En el Karst de mesa, las cavernas, las simas y las dolinas, están excavadas a lo largo de las diaclasas, a menudo en la intersección de dos de ellas, por constituir estas intersecciones líneas de mínima resistencia que facilitan la labor de la erosión. En general, estas formas de erosión (formas las más primitivas de la evolución cárstica) tienen tendencia a alargarse verticalmente, es decir, en el sentido de las diaclasas, de donde resulta un dominio de la altura en las cavidades subterráneas engendradas en el Karst de mesa. Los planos de estratificación sólo desempeñan un papel muy secundario. La resurgencia de las aguas absorbidas en la superficie de las plataformas estructurales, está determinada por una capa impermeable inferior, lo que permite a la carstificación atravesar toda la masa caliza de arriba a abajo. No se encuentran nunca fuentes ascendentes. Nos hallamos en el dominio de la vertical, tanto en las formas internas como en el conjunto de la evolución subterránea.

Uno de los ejemplos más grandiosos de Europa, de Karst de plataforma estructural, nos lo ofrecen las «causses». A pesar de que su estructura no tiene la rigidez de una «mesa» se acerca mu-

cho a este ideal estructural; por lo menos, extensas zonas de las «causses» obedecen a estas características. Entre todas, la que tal vez ofrece caracteres más limpios es la pequeña «causse» de Camprieu, donde el río Bonheur ha excavado la impresionante caverna de Bramabiau. El conocimiento de esta caverna se debe casi íntegramente a Martel (35) (37) (4), de tal modo, que poco

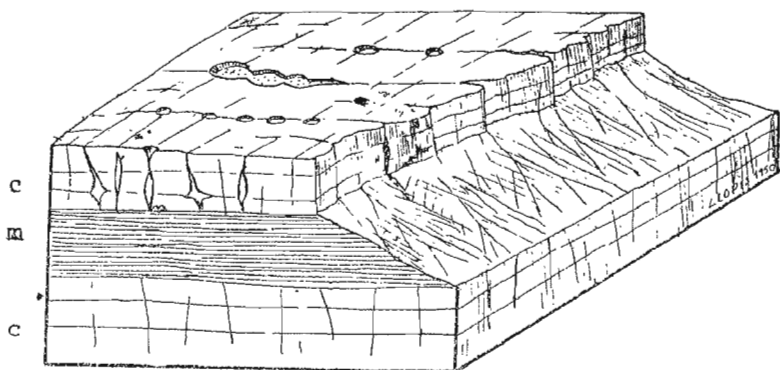


Fig. 1.—Tipo de Karst de «mesa»: c, Calizas; m, Margas, nivel de base cárstico. Todas las formas subterráneas y superficiales evolucionadas se alargan según la vertical

se ha hecho, en el sentido hidrogeológico, después de él, de manera que tal vez el más claro y bello ejemplo de Francia, de karst de «mesa», está todavía para estudiar desde el punto de vista morfológico e hidrológico.

En la resurgencia de Bramabiau, largamente penetrable, el Bonheur hipogeo se ha excavado profundamente en las calizas del lias, utilizando las diaclases N.-S., N. 10° W., N. 30° W., E.-W. y E. 20° N., todas ellas rígidamente verticales. Las diaclases N.-S., por donde emerge la resurgencia, han sido excavadas más de 50 metros, por lo que la caverna de Bramabiau se desarrolla extraordinariamente según la vertical, sobre todo si se tiene en cuenta que su anchura media no sobrepasa los cinco metros. Las formas de absorción, modeladas sobre la plataforma de calizas liásicas,

son del tipo «ponor». El sumidero actual, poco aparatoso, tiene un «sumidero trop-plein» que absorbe aguas en las épocas de crecidas del Bonheur, formado por una cavena-túnel de más de 100 metros de longitud de una grandiosidad inigualable.

En las grandes «Causse», Causse de Sauveterre, Causse Noir, Causse Mejean, las numerosas fallas verticales de estilo germánico que cruzan las plataformas de calizas del jurásico medio y superior, han dividido las plataformas estructurales primitivas en una serie de dovelas limitadas por fracturas, que luego han sido niveladas por ciclos de erosión terciarios, de tal modo que en realidad el Karst de las grandes «causses» es un Karst de penillanura; pero para los efectos morfológicos sigue siendo Karst de «mesa», puesto que los bloques apenas han basculado y los buzamientos máximos no pasan nunca de los 10°. Y en efecto, sigue manifestándose en las cavidades subterráneas el predominio de la vertical en las formas primitivas. No obstante, muchas de las más importantes cavernas de estas «causses», como las cuevas de Dargilan en la Causse Noir (37) o el Aven Armand (37) sobre la Causse Mejean, presentan una morfología clástica muy desarrollada que enmascara completamente las formas de erosión primitivas y determina desarrollos en sentido horizontal. Pero allí donde aparecen las formas primitivas, que son las típicas, las cavidades tienen siempre un magnífico desarrollo vertical. Otro típico ejemplo de esta morfología subterránea de «mesa» nos lo ofrece el Gouffre de Padirac, en la Causse de Query (35 (18) (37), que presenta formas alargadas verticalmente según las diaclasas, muy semejantes a las de Bramabiau. Las galerías inundadas por la «Rivière plane», que alcanzan más de 30 metros de altura por cuatro a cinco de anchura, están instaladas sobre diaclasas NW.-SE. y N.-S., que apenas han sufrido modificación alguna.

Estos ejemplos franceses de Karst de «mesa» se desarrollan en todo su esplendor a consecuencia de tratarse de «holokarsts» en el sentido de Cvijic (6), puesto que el nivel de base de estos aparatos cársticos está representado por los zócalos paleozoicos o

graníticos teóricamente impermeables, y, en general, las potencias de los sedimentos calizos que sobre ellos se apoyan exceden de los 300 metros, lo que permite un gran desarrollo en el sentido vertical.

En España no se conocen ejemplos de Karst de «mesa» con estas características, es decir, presentando análogo desarrollo vertical y horizontal, puesto que nuestras plataformas calizas presentan frecuentemente intercaladas capas margosas impermeables que hacen abortar el desarrollo cárstico en profundidad y sólo permiten la formación de «merokarst». Además sólo aparecen «mesas» extensas en las zonas laxas de los países de plegamiento como en las montañas béticas o en las regiones tabulares de los plegamientos de antepaís, como el frente SW. de la cordillera Ibérica o las zonas tabulares de la provincia de Tarragona. En la cordillera Ibérica tenemos el magnífico ejemplo de la Ciudad Encantada de Cuenca (19), desarrollada sobre las calizas aptienses horizontales, y en Andalucía, el célebre Torcal de Antequera, ambos ejemplos de Karst muerto, equiparables solo en parte a las Causses del macizo central francés.

El Karst de *penillanura* representa un tipo mucho más complicado, puesto que en el caso de las penillanuras típicas, o si se quiere, indiscutibles, la superficie de la penillanura corta una estructura generalmente compleja, sea de pliegues o de fallas, lo que implica la presencia de buzamientos irregulares y desplazamientos de los planos de las diaclasas. Se pierde la clara regularidad del Karst de «mesa», y en las zonas de grandes buzamientos, los planos de estratificación tienen un papel más importante que las diaclasas en la formación de las cavidades subterráneas, de donde resulta un dominio de formas horizontales o inclinadas en las cavernas y solamente inclinadas en las simas. La estructura tectónica desempeña aquí el principal papel: los sinclinales son generalmente zonas colectoras y las fallas actúan de *colectoras* o de *barreras* en el sentido de Géze (15). Se encuentran corrientemente manantiales ascenden-

tes. En todo momento, morfología y evolución subterránea están condicionadas por la estructura tectónica.

Muy semejante al anterior, pero más complejo, es el *Karst de los relieves policíclicos*. Del mismo modo que la penillanura representa una forma primitiva del relieve policíclico, el Karst de penillanura es también una forma sencilla del Karst de relieves policíclicos. En él encontramos el ejemplo más complejo de Karst de llanura en el cual las relaciones entre ciclo de erosión normal y ciclo cárstico se hacen más evidentes. Puede suceder:

1. Que el relieve precárstico sea ya un relieve policíclico.
2. Que el relieve precárstico sea monocíclico y una nueva carstificación suceda a cada ciclo de erosión normal.

En el primer caso, el Karst tendrá los mismos caracteres que el Karst de penillanura; únicamente las formas de absorción (dolinas y simas) se encontrarán escalonadas en las hombreras de los ciclos normales sucesivos.

En el segundo caso, la instalación cárstica es mucho más compleja, pues en los escalones de los ciclos superiores habrá una interferencia de formas jóvenes de la última carstificación con las formas maduras y muertas de las carstificaciones anteriores. En el primer caso, un Karst monocíclico interfiere con un relieve policíclico; en el segundo caso, un Karst policíclico interfiere con un relieve también policíclico. Es entonces cuando aparecen las formas que en otra ocasión he llamado «simas residuales» (23) muertas y fósiles, al lado de las dolinas incipientes.

En este caso es también frecuente que el rejuvenecimiento del ciclo normal y del ciclo cárstico instalado sobre él alcance a las formas cársticas muertas y sobre todo fosilizadas. El fenómeno es especialmente evidente en las formas internas fosilizadas por relleno estalagmítico o mecánico. Entonces las nuevas cavidades formadas se modelan en parte en la roca madre, en parte en el relleno, cuyos residuos denuncian la antigua fosilización. En las cavernas que han servido de formas de conducción se encuentran en-

tonces depósitos de aluviones cementados, escalonados como las terrazas de los ríos epigeos.

En algunos casos, si pueden separarse las formas pertenecientes a ciclos cársticos diferentes y se conocen las edades de los ci-

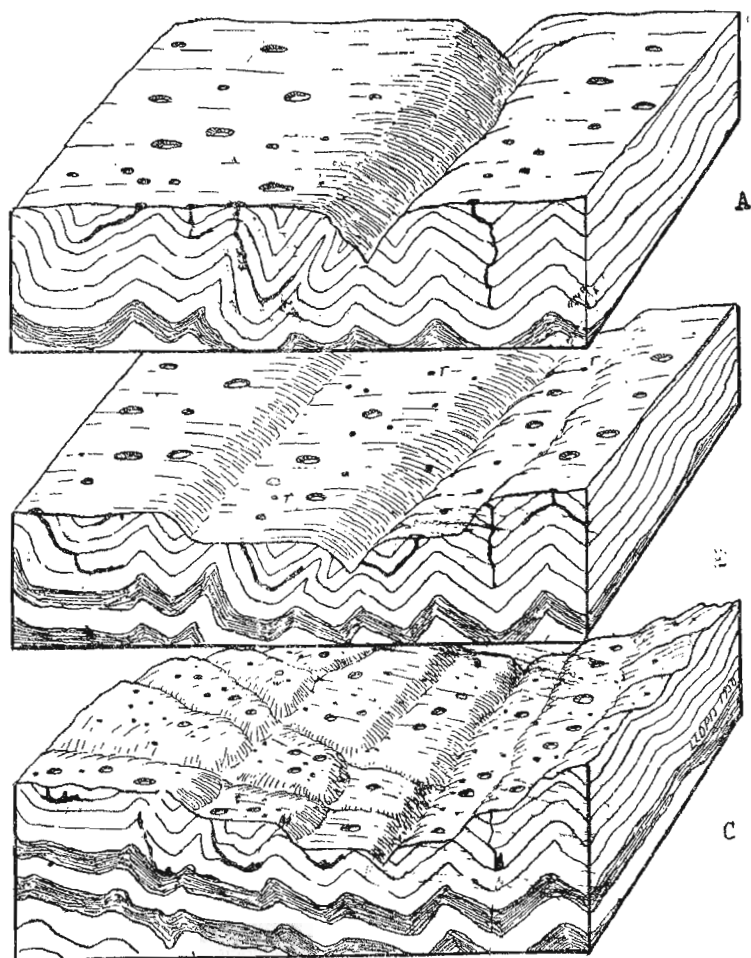


Fig. 2.—Karst instalado sobre relieves policíclicos: A. Karst de penillanura. Todas las formas pertenecen al mismo ciclo cárstico, instalado sobre la penillanura. B. Relieve bicíclico, procedente del anterior. Las formas de la segunda fase de carstificación se instalan indiferente sobre ambos ciclos, pero en el segundo hay formas residuales (r). C. Relieve policíclico procedente del anterior. Las formas residuales aparecen también en la gipffelstur superior resultante de la degradación del primer ciclo

culos de erosión normales, podremos también conocer la edad de los ciclos cársticos. Las formas y la evolución subterránea presentan los mismos caracteres que en el caso del Karst de penillanura.

A consecuencia de la gran difusión que presentan los relieves cíclicos, estos últimos tipos de Karst se encuentran enormemente difundidos, representando probablemente el 50 por 100 de los aparatos cársticos, de tal modo que podríamos multiplicar los ejemplos a este respecto.

También las plataformas calizas del reborde SE. del Macizo Central francés nos ofrecen ejemplos didácticos de este tipo de carstificación. El valle inferior del Ardèche, desde Vallon hasta su confluencia con el Rhône, ha derivado de un relieve policíclico de formación reciente (14). En los relieves comprendidos entre el cañón del Ardèche y Bourg-St.-Andeol, en el valle del Rhône, pueden distinguirse tres niveles de erosión escalonados o penillanuras parciales, desarrolladas sobre las calizas aptienses plegadas: un nivel superior entre 600-720 metros, o nivel de la Dent de Rez (720 metros), que es sólo una gipfelflur; un nivel medio a 400 metros, ampliamente desarrollada al norte de St. Réméze, y un nivel superior situado entre 290 y 300 metros, suavemente descendente hacia el valle del Ardèche, que constituye la amplísima plataforma de erosión de Bidon. Sobre esta última plataforma interfieren formas cársticas de edades muy diferentes: l'Aven Marzal, por ejemplo, es una forma antigua, testigo de una poderosa acción turbillonar, que en modo alguno puede haberse desarrollado en un relieve como el que actualmente tiene la penillanura parcial de 290-300 metros. Pero esta penillanura está surcada por una serie de valles muertos poco profundos de hasta seis a siete metros, en los cuales se empiezan a instalar dolinas que toman formas tan alargadas que bien pudieran denominarse «dolinas-valles». Estos dos tipos de formas cársticas representan, evidentemente, dos extremos en la evolución cárstica del Ardèche: l'Aven Marzal corresponde a una carstificación anterior a la penillanura de 290-300 metros, y es, por lo tanto, una sima residual, decapitada por esta penillanura

ra; las dolinas-valles, en cambio representan las formas recientes de un nuevo ciclo cárstico que comienza en la actualidad sobre una fase de erosión fluvial epigea abortada, representada por los valles que surcan la penillanura de 298-300 metros.

Al SW. del Ardèche, entre Orgnac y Barjac, tenemos en l' Aven d'Orgnac otra forma residual instalada sobre la penillanura de 290-300 metros, rodeada también de multitud de dolinas jóvenes en plena actividad.

En España encontramos un bello ejemplo de este tipo de Karst en los relieves cíclicos del SW. de Barcelona, entre el Llobregat y la depresión del Penedés, que forman el llamado macizo de Garraf (21) (25) (28). Allí las calizas urgo-aptienses plegadas están cortadas por un relieve policíclico reciente formado por tres niveles, de arriba abajo:

N₁: penillanura de 350 a 500 metros de edad, probablemente pontiense, que aparece en forma de retazos entre fallas, cuyo movimiento se ha efectuado con posterioridad a la peneplanización.

N₂: penillanura parcial de 300 metros.

N₃: penillanura parcial de 260 metros.

Las variadísimas formas cársticas que presenta este macizo interfieren, evidentemente, con estos tres ciclos de erosión epigea. Unas son formas muy antiguas, residuales, que corresponden probablemente a la carstificación desarrollada sobre la superficie pontiense antes de su fragmentación y rejuvenecimiento parcial por el juego de las fallas. Algunas de ellas son formas fósiles, como el Avenc de l'Arcada o Font y Sagué, que sufrió un relleno por estalagmitización, y fué posteriormente rejuvenecido por los ciclos cársticos posteriores, como lo acreditan las formas de erosión modeladas indiferentemente en la roca madre y en la masa estalagmítica. Otras, por el contrario, son formas muy modernas, como las dolinas del Pla d'Ardenya o del Pla de Basses, que representan las formas de absorción de la carstificación actual. En mis últimas investigaciones sobre este macizo (25) distinguía por lo menos dos ciclos cársticos, separados por una fase de erosión epigea; pero es

casi seguro que las fases de carstificación han sido tres, posiblemente más.

Estos ejemplos nos ilustran acerca de este fenómeno esencial de *interferencia de formas de edades diferentes*, indispensable para comprender la coexistencia de formas cársticas en estados de evolución tan diferentes que no es posible poder atribuirlos a un mismo ciclo cárstico, y que nos revelan la complejidad de los fenómenos que han intervenido en la evolución cárstica de un macizo calizo.

En el *Karst de montaña*, las formas externas están adaptadas totalmente a la estructura tectónica, y a consecuencia de la heterogeneidad del relieve estructural se dispersan irregularmente a alturas a veces muy diferentes. El tipo más sencillo es el *Karst de cuesta*; tipo muy extendido no solamente en los países plegados de estilo jurásico y aun en los de estilo isoclinal e imbricado. En los países de cuestras, determinados casi siempre por la alternancia de capas margosas o arcillosas y capas calizas, se forman varios aparatos cársticos independientes, uno en cada capa caliza [merokarst de Cvijic (6)], bien delimitados por las capas impermeables no fisuradas, pero derivando todos de una misma carstificación. El desarrollo en profundidad de este Karst está delimitado por la capa margosa subyacente o por el nivel de base epigeo. En las cavidades subterráneas desempeñan idéntico papel las diaclasas y los planos de estratificación, porque a consecuencia del buzamiento de los estratos ambas tienen la misma inclinación y ofrecen, por consiguiente, análoga resistencia a la erosión. Las formas de erosión engendradas son sensiblemente simétricas por desarrollarse en todas direcciones; las dolinas y los sumideros son, en cambio, formas disimétricas, teniendo una pendiente suave en el sentido del buzamiento y una pendiente brusca, casi vertical, en sentido perpendicular a él.

En los países de estilo jurásico, las formas cársticas son muy parecidas a las de los países de cuestras, pero la evolución hidrogeológica es mucho más compleja, pues sigue, en líneas generales,

la evolución del relieve. La carstificación comienza en los ejes de los anticlinales (pues es por allí por donde comienza también la evolución del relieve), y progresa en profundidad; las primeras zonas colectoras se forman a lo largo de los ejes de los anticlinales, sobre todo si estos ejes tienen oscilaciones verticales, dando lugar al caso, sorprendente al primer vistazo, de ríos subterráneos excavados en los ejes de los anticlinales. Pero estas formas son siempre

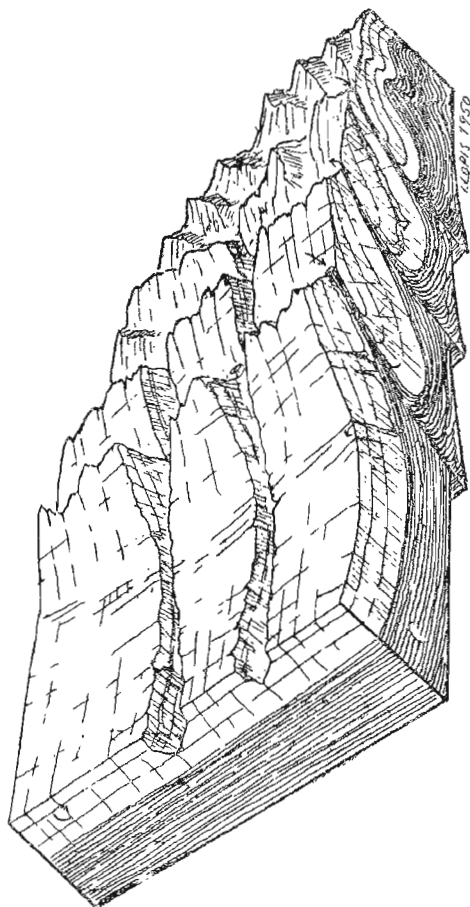


Fig. 3.—Karst de montaña. Adaptación de los aparatos cársticos a la estructura e independencia absoluta, con individualización de formas

precoces y a menudo abortan antes de llegar a la madurez, pues la carstificación se propaga hacia los ejes sinclinales, donde se for-

man las zonas colectoras más importantes y permanentes. Las formas de absorción son únicamente «dolinas estructurales», o si se quiere, «dolinas de cuesta», con rebordes disimétricos, como las formas de absorción de las cuestas, disimetría desarrollada como consecuencia de la adaptación al buzamiento de las capas. Las formas subterráneas primitivas están también condicionadas por el valor del buzamiento de tal manera que, en general, *el papel de las diaclasas es inversamente proporcional al ángulo del buzamiento*. Hemos visto que en las mesas el Karst está enteramente adaptado a las diaclasas, y veremos seguidamente que en los países de estratos verticales el papel de las diaclasas en la carstificación queda considerablemente reducido a consecuencia de la posición vertical de los planos de estratificación; los dos sistemas de diaclasas dominantes, longitudinal y transversal, que en general cruzan las rocas sedimentarias, son verticales o subverticales cuando los estratos son horizontales, mientras que uno de ellos toma posición horizontal cuando los estratos están verticales, y, por lo tanto, la erosión utiliza solamente el 50 por 100 de los planos de diaclasas, y en cambio, la totalidad de los planos de estratificación. El conjunto óptimo para la instalación cárstica lo encontraremos, pues, en zonas cuyos buzamientos oscilen alrededor de los 45° por producirse entonces la máxima densidad de planos de diaclasa y de estratificación con la superficie libre del relieve. He aquí el esbozo de una ley de infiltración del agua en las zonas cársticas que es necesario controlar, con algunos otros centenares de ejemplos, para aceptarla definitivamente.

En el Karst jurásico, la evolución está, pues, condicionada por los ejes de los sinclinales, y todos los aparatos cársticos desarrollados en una misma capa están más o menos relacionados. Las surgencias principales aparecen siempre en los ejes sinclinales; algunas veces son fuentes de tipo «artesianoide» que emergen a lo largo de fallas o de diaclasas.

En los estilos isoclinal e imbricado, pasamos a dos tipos de Karst mucho más complejos, tanto en los aparatos de absorción como en los órganos subterráneos. El *Karst isoclinal* se parece mucho al Karst de «cuesta»; pero todos los aparatos que resultan de unamisma carstificación pueden estar relacionados como conse-

cuencia de la repetición sucesiva de una misma capa caliza. En el *Karst imbricado*, las superficies de deslizamiento, y sobre todo las zonas de milonitización, desempeñan un papel preponderante en la absorción y aun en la excavación de las formas subterráneas. La mayoría de los sumideros importantes se instalan sobre contactos anormales, en los cuales casi siempre se encuentran capas arcillosas o margosas que condicionan el desarrollo del Karst en profundidad. En todos estos Karst, típicos de montaña, los planos de estratificación desempeñan el principal papel en la excavación de las cavidades subterráneas como consecuencia de los valores de los buzamientos, a menudo superiores a los 35°. Las formas externas, escalonadas a diferentes niveles sin relación alguna con niveles de erosión, son extremadamente variadas, aunque siempre adaptadas a la estructura tectónica, y las surgencias aparecen a menudo en lugares sorprendentes a consecuencia de las innumerables fracturas, diaclasas desplazadas o contactos mecánicos.

Los ejemplos que podemos citar de típicos Karst de montaña en sus diversas variantes, son múltiples y variadísimos. Especialmente en España, donde los relieves de plegamiento antiguos y modernos desempeñan un papel tan importante en la topografía, tenemos multitud de ejemplos de estos tipos cársticos. Una de las regiones más típicas es la cordillera norte de Mallorca, donde la carstificación se ha adaptado a un complejo sistema de pliegues imbricados, formando escamas, vergentes hacia el NW. (10) (17) (30). Gran parte de este Karst mallorquín es un merokarst, pero desarrollado en unas proporciones poco corrientes. Especialmente las escamas de calizas jurásicas de los alrededores de Sóller, Formentor y el macizo del Puig Major ofrecen ejemplos típicos de Karst de montaña. En los frentes de las escamas o de los pliegues más altos se desarrollan las formas de absorción, dolinas, uvalas o poljés, adaptadas, como en las vertientes meridionales del Puig Major, a la forma de los pliegues y alargados, según los ejes; las formas de conducción siguen los planos de estratificación o de laminación de las escamas, y las surgencias son a menudo fuentes ascendentes y a veces intermitentes, como la Font de Malany, de Campanet (30) (Inca).

En las montañas vascas y cantábricas pueden multiplicarse los ejemplos. En estos puntos, y a consecuencia de la elevada preci-

pitación anual, el Karst de montaña evoluciona rápidamente, y son frecuentes las pérdidas de ríos en sumideros que resurgen aguas abajo de los valles o cuyas resurgencias son desconocidas. Las cavernas se adaptan también a la estructura tectónica, como en el bello ejemplo de Troskaeta-ko-kobea (Ataún, Guipúzcoa) (29), sumidero muerto de un antiguo valle plioceno, cuyas formas internas se han instalado en el eje de un pseudosinclinal de las calizas urgonienses de las Peñas de Aizcoate.

En Asturias, el 95 por 100 del Karst pertenece a este tipo. En esta región todas las calizas aparecen carstificadas; pero los ejemplos más grandiosos de aparatos cársticos se encuentran en la «caliza de montaña» del dinantínense por ser la que tiene mayor potencia y determina los relieves más destacados. No se puede entrar en detalles acerca de estos ejemplos, pues cada uno de ellos requeriría una monografía especial.

También ha de colocarse entre los tipos de Karst de montaña el *Karst de falla*, desarrollado en los países tabulares o plegados, pero fracturados después del plegamiento; este tipo suele encontrarse en los antepaíses con cobertera caliza discordante o en las extensas plataformas de los interpaíses. En sus líneas esenciales se parece mucho al Karst de mesa, pero su desarrollo es mucho más complejo, como resultado de la compartimentación de las mesas calizas en bloques desnivelados y en dovelas de muy diversas jerarquías, con buzamientos muy variados. Las formas de absorción importantes son casi siempre fallas, y también las zonas colectoras se establecen en los límites de los bloques. En su consecuencia, las grandes simas y las cavernas importantes están situadas siempre sobre las fallas. Abundan las resurgencias y las fuentes ascendentes, y la diversidad de formas superficiales y subterráneas, en el mismo aparato. Las zonas de máxima fracturación de las Causse y ciertas regiones muy dislocadas del macizo de Garraf, cerca de Barcelona, podrían servir de ejemplos.

Pero en realidad todos estos Karst son prototipos que sólo aparecen en forma típica en un 10 o a lo más 15 por 100 de los macizos cársticos; en el 85 por 100 restante se encuentran formas

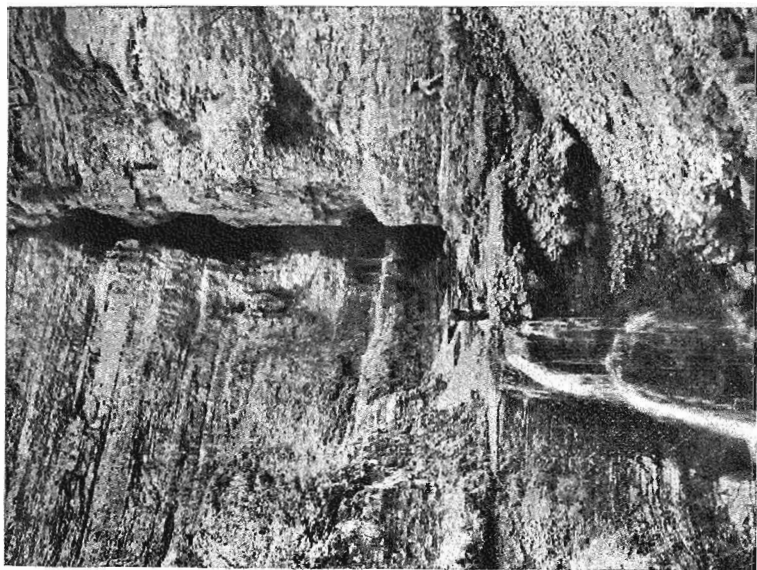


Fig. 1.—Resurgencia de Brambiau (Causse de Camprieu, Francia) por una diaclasa N.-S. Tipo de Karst, de mesa, con formas rigidamente orientadas según diaclasis. Estado juvenil.—(Foto Llopis.)

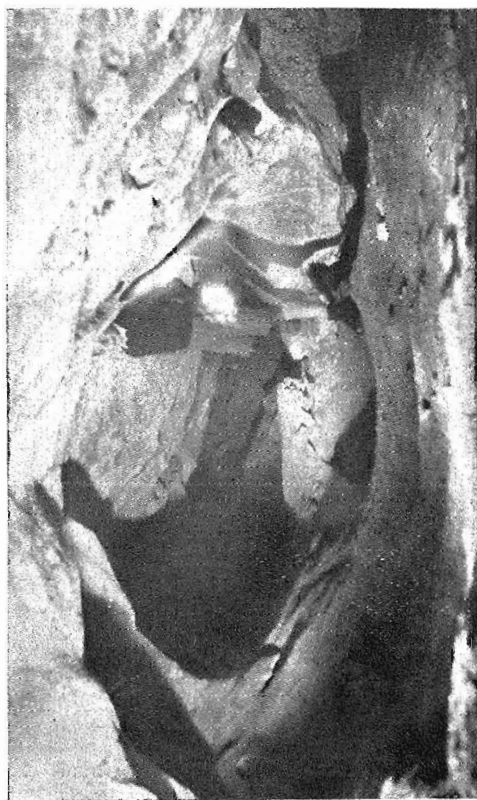


Fig. 2.—Formas juveniles, de erosión turbilhonar en la cueva de D. Xuan (Farres-Llanes, Asturias) — (Foto Llopis)



Fig 3.—Cacs de bloques y bóveda en arco, típica de hundimiento, en la Cueva Negra, Montaneos (Castellón de la Plana).—(Foto Llopis.)

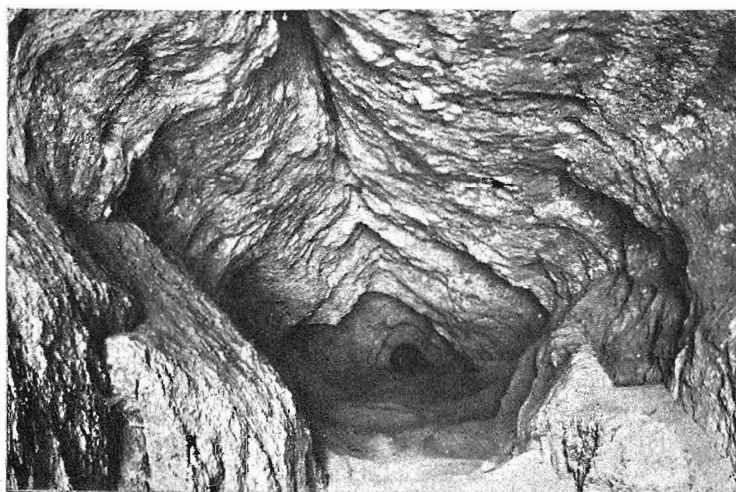


Fig 4 — Formas mixtas de diaclasa y plano de estratificación en la Cova Simanya (Sant Llorenç del Munt, Barcelona). Formas aortadas, en plena fase de juventud (Foto Llopis.)

mixtas y formas de paso entre los diferentes tipos descritos, como consecuencia de la complejidad tectónica y petrográfica de la mayoría de las regiones calizas, aun de los países tabulares. De aquí el Karst que puede llamarse *híbrido*, cuyo análisis nos descubrirá una serie de tipos puros que no tienen suficiente desarrollo y extensión para poder hacer con ellos tipos aparte.

El carácter híbrido de este Karst se manifiesta tanto en las formas externas como en las subterráneas. En el regular desarrollo de los conductos de un Karst jurásico, por ejemplo, una falla o un pequeño pliegue accesorio introduce una anomalía notable que hace cambiar localmente toda la morfología de la caverna. Las formas puras sólo son locales o fragmentarias. Estamos en el dominio de la irregularidad morfológica.

Conclusión: de la exposición de las características de todos los tipos de Karst que acaban de enumerarse pueden deducirse tres importantes consecuencias de orden general:

1. La influencia que el relieve precárstico tiene en el establecimiento de las formas de una carstificación determinada.
2. La interferencia de formas de edades y en estado de evolución muy distintos sobre una misma superficie.
3. La influencia de la estructura, y especialmente de la posición relativa de las diaclasas y planos de estratificación en la excavación de los órganos subterráneos.

II. LAS FASES DE EVOLUCION DE LAS CAVERNAS Y LA MORFOLOGIA SUBTERRANEA

Hemos dicho que la evolución subterránea es sólo una parte de un ciclo mucho más amplio, el ciclo cárstico. Pero en este pequeño ciclo subterráneo hay que considerar un conjunto de fases que se suceden y que algunas veces interfieren, complicando extraordinariamente la evolución. Este conjunto de fases se desarrolla entre dos puntos extremos: la fisura, o si se quiere, su forma ya

evolucionada, la *forma de erosión*, y la caverna fosilizada por relleno, sea estalagmítico, sea aluvial.

Por consiguiente, la caverna tendrá un primer *periodo o fase de juventud* (2), durante el cual se modelan un conjunto de formas que pueden llamarse *formas primitivas o de erosión*. Si nos atenemos a las ideas de Lehmann (20), estas formas de erosión están escalonadas en la masa caliza en dos pisos: uno superior, de circulación a presión hidrostática, y, por consiguiente, de erosión turbillonar, y otro inferior, de circulación libre, es decir, de régimen netamente fluvial, y, por lo tanto, de erosión regresiva, análoga a la de los ríos epigeos. Ambos tipos de erosión aparecen claramente diferenciados en las cavernas, pero muchas veces no están separados en pisos, sino que interfieren a consecuencia de que, a nuestro modo de ver, representan en realidad dos estados diferentes de evolución de las formas de erosión, incluyendo en ellas tanto los procesos puramente mecánicos como los fenómenos químicos de corrosión. La erosión turbillonar a presión hidrostática representa la forma más primitiva; la erosión fluvial es ya una forma más evolucionada que marca el final de la juventud de la caverna (2). Esta fase de juventud se desarrolla completamente en la «zona húmeda» de Cvijic (7), que nos parece no puede en modo alguno ser eliminada de la hidrografía cárstica. En esta primera fase la sedimentación es muy reducida, pues los ríos hipogeos son permanentes.

Un segundo período o *fase de madurez* sigue al anterior; el río subterráneo circula en profundidad, bajo un conjunto de galerías y corredores que en general están en seco, pero que pueden ser inundados en los períodos de lluvias o, en las montañas, en las épocas de fusión de las nieves. Estas cavernas, que bien podrían denominarse «cavernas-trop-plein», están situadas en la «zona semihúmeda de Cvijic», y funcionan intermitentemente. En estas cavernas trop-plein se desarrollan todavía las formas de erosión fluvial, y hasta turbillonar, en las máximas avenidas; pero durante los estiajes comienza la *litogénesis química*, o si se quiere, la *estalagmi-*

tización, al lado de depósitos clásticos de cantos, arenas y arcillas, aportados durante los períodos de avenida.

Durante los períodos secos tiene una gran importancia la decalcificación del techo de las cavernas, consecuencia de la infiltración a través de las diaclasas y aun de las leptoclasas, que termina con hundimientos en grande y pequeña escala, es decir, se llega a un período o *fase de decalcificación y hundimiento* que normalmente complica la topografía de la caverna, añadiendo a la primitiva morfología de erosión una *morfología clástica*, formada por caos de bloques angulosos y por conos de deyección, hemicónicos, como los epigeos, si proceden de las paredes, y completamente cónicos cuando se forman por hundimientos de las bóvedas.

Los sedimentos, ya sean litoquímicos o clásticos, comienzan a dividir la caverna en compartimientos, y acaban con el relleno total, es decir, por la fosilación de la cavidad: el ciclo subterráneo ha llegado a su fin.

En la mayoría de los casos estas fases no se suceden de una manera regular, sino que, en general, se observan múltiples interferencias que complican extraordinariamente la evolución, vislumbrándose la presencia de una serie de pequeños ciclos secundarios dentro del principal, que se desarrollan sobre todo en los períodos de régimen torrencial.

Como resultado de esta evolución, pueden, pues, distinguirse en las cavernas varios tipos de morfología.

1. Morfología de erosión o morfología primitiva, propia de las cavernas jóvenes, de roca desnuda.

2. Morfología postiza o sedimentaria, que puede estar formada:

a) Por depósitos de aluvión o lacustres (morfología aluvial).

b) Por caos de bloques y conos de deyección (morfología clástica).

c) Por estalagmitización (morfología litoquímica o de reconstrucción (11).

El conjunto de la evolución de una caverna puede ser resumido, en el caso más sencillo, de la siguiente manera:

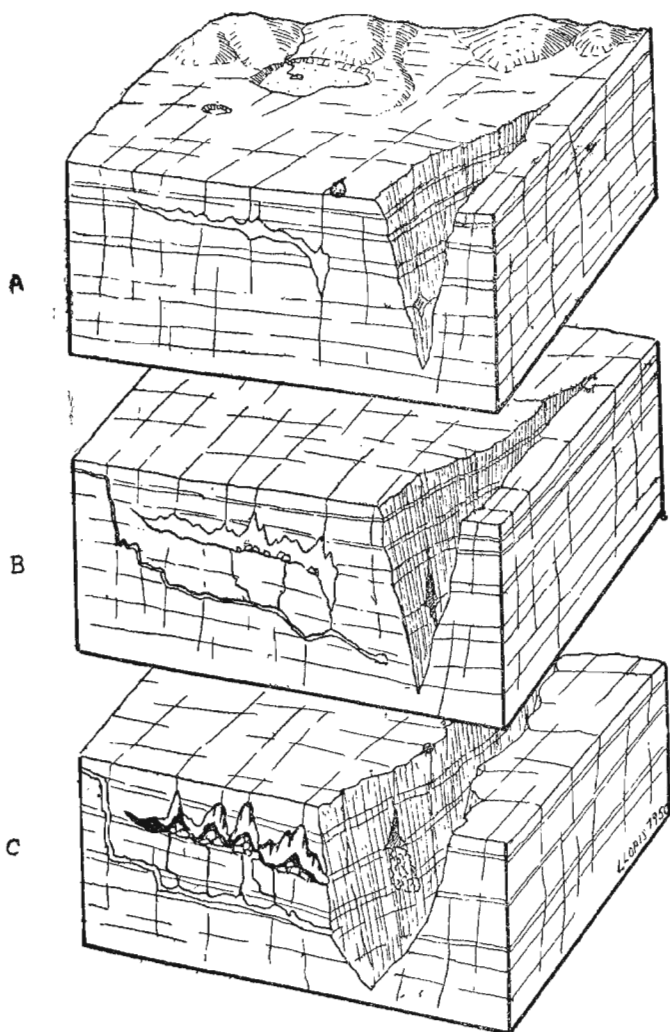


Fig. 4.—Tres fases del ciclo subterráneo: A. Fase de juventud. Dominio de las formas de erosión. B. Fase de madurez. Abandono de las cavidades superiores donde se inician procesos clásticos. Muerte de la caverna superior. C. Fase de senilidad. Estalagmitización y fosilización de la caverna superior

El resultado morfológico de esta compleja evolución es el progresivo enmascaramiento de las formas de erosión primitivas hasta quedar completamente borradas por la fosilización. Cuanto más avanzado esté el ciclo subterráneo tanto menos visibles serán las huellas de la erosión primitiva; más cerca estamos de la senilidad.

FASES	FORMAS SUBTERRANEAS	HIDROLOGIA	ZONAS DE PROFUNDIDAD
Fase de estalagmitización Fase de madurez Fase de hundimiento	Fisura	Ríos hipogeos permanentes	Zona húmeda
	Ensanchamiento		
	Formas de erosión	Ríos hipogeos torrenciales o transitorios	Zona semi-húmeda
	Sedimentación aluvionar		
	Sedimentación clástica		
	Formas clásticas	Karst muerto	Zona seca
	Sedimentación química		
Formas de reconstrucción	Karst fósil		
Fosilización			

Entonces todas las formas subterráneas se parecen, sea cualquiera el tipo de Karst a que pertenezcan. Es inútil que busquemos formas alargadas, según la vertical, en un Karst de «mesa» si el ciclo subterráneo está muy avanzado, como ocurre con muchas de las más célebres cavernas de las Causses, como la Grotte de Dargilan, Aven Armand, Grotte de Demoiselles (Herault), y en las cue-

vas de las plataformas miocénicas del sudeste de Mallorca, como las grutas del Drac y dels Hams; en todas ellas los procesos clásticos y reconstructivos están tan avanzados que han borrado las huellas de las formas verticales que debieron tener al principio.

Pero no todas las cavernas mueren por realización completa del ciclo subterráneo; cuando por causas climáticas o epirogenéticas las cavernas son abandonadas bruscamente por el agua se produce el aborto del ciclo cárstico, y las formas primitivas se conservan intactas; lo propio ocurre si las características de la red de diaclasas o la situación de la caverna, con respecto a la morfología externa, no favorecen la infiltración lenta, principal responsable de los procesos clástico y reconstructivo. En todos estos casos, las cavernas, completamente muertas, conservan, no obstante, su primitiva morfología de erosión, como ocurre con los ejemplos estudiados por mí mismo en los relieves del norte de Tarrasa (Barcelona), en la cueva Simanya (23), ejemplo típico de caverna abortada en plena fase fluvial, o el todavía más grandioso ejemplo de la Grotte Favot, en el Vercors (Prealpes franceses) (3).

Tampoco la fosilización representa forzosamente la muerte definitiva de la caverna, puesto que a veces, y casi siempre por inauguración de un nuevo ciclo cárstico, la erosión se realiza más fácilmente en las zonas fosilizadas, especialmente si la fosilización no es total; entonces aparecen una serie de interesantes fenómenos de erosión en los depósitos, especialmente ostensibles en las estalagmitas, como los observados en las cuevas del Salitre o de Collbató (Montserrat, Barcelona) (*), y en la Grotte de Cabrerets (Lot, Francia), donde las estalagmitas aparecen profundamente erosionadas; especialmente en Cabrerets, la erosión del segundo ciclo tuvo tal intensidad que sólo se conservan en las paredes de la caverna girones del relleno estalagmítico del primer ciclo, presentando las típicas figuras de corrosión, características de las masas cris-

(*) En curso de publicación.

talinas sometidas a un proceso de disolución. En una palabra, asistimos al rejuvenecimiento hidrológico de la caverna, en la cual, si llega a realizarse otro ciclo completo, nos encontraremos con una *interferencia de formas subterráneas*, pertenecientes a ambos ciclos, siendo las de la nueva formación las que se instalarán sobre las del primer ciclo.

Estas concepciones hacen vislumbrar un mundo de posibilidades en el estudio de la hidrología cárstica, que así se nos aparece con una complejidad mucho mayor que la concebida hasta ahora. Una conclusión importante puede sacarse de este conjunto de consideraciones: *Que la interferencia de formas de dos ciclos cársticos superpuestos*, no sólo se manifiesta en las formas externas, sino que aparece también claramente en la morfología interna de las cavernas afectadas, de tal manera que no me parece aventurado hablar de verdaderos *Karst superpuestos*.

III. CONSIDERACIONES ACERCA DE LA CIRCULACION CARSTICA

A. *Los caracteres de los ríos hipogeos.*

Para poder comprender la evolución de las cavernas es necesario partir del principio de que toda cavidad subterránea ha sido, en época más o menos lejana, un río subterráneo o una forma derivada de él. A pesar de que muchas cavidades de la zona seca no tengan las menores huellas de thalwegs hipogeos o de formas de erosión, no hay duda alguna que son los descendientes más o menos lejanos de antiguos ríos subterráneos.

El río subterráneo es, pues, la fuerza generatriz inicial de las cavernas y, por tanto, precisa ser bien conocido. Al primer vistazo se distinguen dos tipos fundamentales:

1. *Ríos alóctonos*, formados por ríos epigeos exóticos que pierden total o parcialmente su caudal al atravesar las zonas calizas fisuradas y, por tanto, tienen, desde el primer momento, un poderoso poder erosivo.

2. *Ríos autóctonos, o colectores*, formados en el interior de los macizos calizos por reunión de las aguas infiltradas a través de las fisuras y, sobre todo, por las dolinas y poljés. Estos ríos sólo en la segunda mitad de su recorrido comienzan a tener un poder erosivo importante.

El río subterráneo, sea alóctono o colector, está condicionado por un conjunto de factores que lo distinguen netamente de los ríos epigeos. Las principales diferencias que se aprecian son las siguientes:

a) El río epigeo circula siempre libremente a lo largo de un thalweg. El río subterráneo puede circular libremente o bajo presión hidrostática, encerrado en verdaderos tubos hidráulicos, o puede aun ser mixto, es decir, circular en parte bajo presión y en parte libremente.

b) El río epigeo circula siempre en el mismo sentido. Los retrocesos, debidos a los meandros, sólo son locales y sin importancia general. El río subterráneo, en cambio, puede cambiar totalmente el sentido de la circulación, sobre todo en los Karst de mesa y de penillanura.

c) El río epigeo es siempre colector, es decir, su caudal aumenta a lo largo de su curso por adición de afluentes. El río subterráneo puede *dividir sus aguas engendrando dos ríos difluentes*.

d) El río epigeo corre siempre de arriba abajo, solicitado por la gravedad. El río subterráneo puede ser sifonante en el caso en que sus aguas sean cautivas y el aparato cárstico funcione, por lo menos en parte, a presión hidrostática.

e) El río epigeo corre condicionado por su nivel de base local. El río subterráneo también; pero a veces es detenido por una capa impermeable, o *nivel de base cárstico*, que obliga al aparato cárstico a quedar *suspendido* sobre el nivel de base epigeo y, en su consecuencia, el Karst evoluciona más lentamente que el río epigeo, que es su nivel de base general.

B. *El nivel de base y la circulación hipogea permanente*

Este último carácter del río hipogeo ha sido uno de los más discutidos por constituir la esencia de la circulación cárstica. Hace sólo cuatro años, Bourgin (3) ha planteado de nuevo el problema del nivel de base, haciendo la crítica de las ideas emitidas a este respecto, sucesivamente, por Martel (34), Grund (16), Cvijic (6) (7) y Lehmann (20). Otras investigaciones se han realizado a este respecto, sobre todo por geólogos norteamericanos como Davis (9), Swinnerton (40) (41) (42) y Gardner (13).

La solución final del problema parece resumirse en admitir o no un nivel piezométrico en el Karst, y la discrepancia en las opiniones surge a consecuencia de que en un mismo sistema hidrográfico subterráneo se encuentran cavidades ocupadas por el agua y otras completamente secas. Aceptando, pues, la proposición de Lehmann (20) de que en un mismo macizo calizo pueden desarrollarse sistemas subterráneos independientes por no existir relaciones entre las fisuras, vamos a circunscribirnos estrictamente a uno de estos sistemas, y en el caso concreto de tratarse de un sistema cárstico autóctono. Nuestras consideraciones se refieren, pues, a un caso concreto de complicación media que reúna los siguientes caracteres:

1. Sistema hidrográfico hipogeo autóctono.
2. Masa caliza horizontal homogénea, sin capas impermeables intercaladas y cortada por un río epigeo.
3. Presencia de una red normal de diaclasas.

Es decir, nos situamos ante un Karst de «mesa» en el que las diaclasas desempeñan el principal papel.

Para poder comprender a fondo el desarrollo de este aparato cárstico tendremos que considerar, ante todo, las características de las diaclasas, que, según mis investigaciones en las «mesas» calizas del norte de Cataluña (calizas arenosas eocenas de la sierra de Berti (Barcelona) (22) (27); calizas eocenas de Les Guilleries, en Tavertet y El Far (Gerona); calizas triásicas del Montseny (Bar-

celona) (22), y calizas eocenas del Empordá (Gerona) (39), pueden dividirse, desde el punto de vista hidrológico, de la siguiente manera:

a) *Diaclasas absorbentes*, que a su vez pueden ser de *absorción libre* o de *relleno arenoso*. En ambos casos la circulación es diferente, pues mientras en las primeras el agua circula igual que en un tubo, en las segundas, dentro de la diaclasa, existe una verdadera percolación, como en los mantos freáticos.

b) *Diaclasas ciegas*, que a su vez pueden ser de *labios muy unidos*, que no permiten la infiltración, o de *relleno arcilloso*, impermeable, y, por tanto, no absorbente.

La infiltración del agua en una masa caliza dependerá, pues, de la *densidad superficial* de diaclasas absorbentes, es decir, del número de individuos por unidad de superficie, y por lo tanto, dependerá, ante todo, de los intervalos existentes entre los individuos de cada sistema. Si aceptamos que todas las diaclasas son absorbentes (27), no cabe duda que podremos establecer con Fourmarier (12) un nivel piezométrico teórico que unirá la superficie del relleno acuífero de todas las diaclasas. Pero como en la realidad sólo parte de las diaclasas son absorbentes, la distribución del agua en nuestro sistema hipogeo será mucho más complicado. En la figura 5 se han representado diversos tipos de diaclasas; N-N' sigue representando el nivel piezométrico teórico; *a*, es una diaclasa totalmente absorbente; *b*, sólo lo es en parte, pues se estrangula hacia abajo, y tiene sólo un relleno acuífero parcial; *c*, es totalmente ciega; *d*, es sólo en parte ciega, y funcionará a presión porque se cierra por debajo del nivel piezométrico; *e*, es totalmente ciega por relleno arcilloso. Los planos de estratificación P-P', *p* *p'*, que relacionan todas estas diaclasas, terminan la formación de un sistema harto complejo que explica la irregular distribución del agua dentro de las figuras de la masa caliza. El río epigeo, nivel de base local de todo este sistema, condicionará a su vez la posición del nivel piezométrico.

En el caso de que los estratos de la masa caliza estén inclina-

dos, la complejidad del ejemplo anterior persistirá, sumándose a ella la anomalía introducida por el buzamiento, puesto que en este caso los planos de estratificación actuarán como fisuras absorbentes, además de las diaclasas, y la circulación subterránea tiende a hacerse en el sentido del buzamiento; pero como además el nivel piezométrico está condicionado, como siempre, por el nivel de base local del río epigeo, el agua circulará según la componente de ambas fuerzas; es decir, transversalmente al sentido del buzamiento. Esto explica los incontables ejemplos de cavernas excavadas longitudinalmente a los planos de estratificación, puesto que en el caso de que el río epigeo se oriente normalmente a la

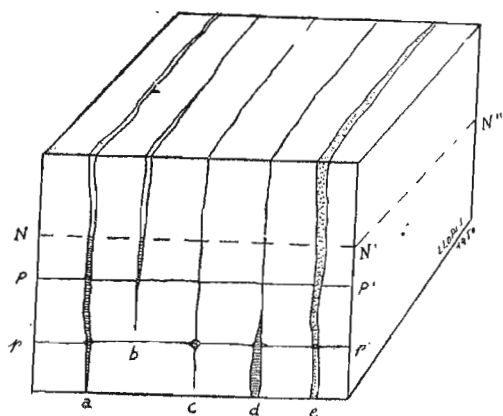


Fig. 5.—Comportamiento hidrológico de las diaclasas y complejidad de la distribución del agua subterránea. (Explicación en el texto)

dirección de los estratos, el papel colector de éstos aumentará proporcionalmente al valor del buzamiento, siendo nulo a 0° y máximo a los 90° . Un ejemplo típico de esta clase de circulación nos lo ofrece el río subterráneo de las cuevas de Villanúa (Huesca), excavadas según la componente de buzamiento y planos de estratificación. Otro bello ejemplo lo tenemos en Sa Cova des Estudiants, en Sóller (Mallorca).

De estas investigaciones puede deducirse que sin repugnancia

alguna puede aceptarse en los macizos calizos un nivel piezométrico para cada sistema hidrológico que tenga relación con el río epigeo, tal como ocurre con la mayoría de las aguas de fisura, sean o no cársticas (43); es decir, un nivel piezométrico teórico.

C. La circulación intermitente.

El nivel piezométrico de un aparato cárstico puede elevarse con el aumento de la precipitación o con la fusión de las nieves, en cuyo caso son invadidas por el agua multitud de cavidades que

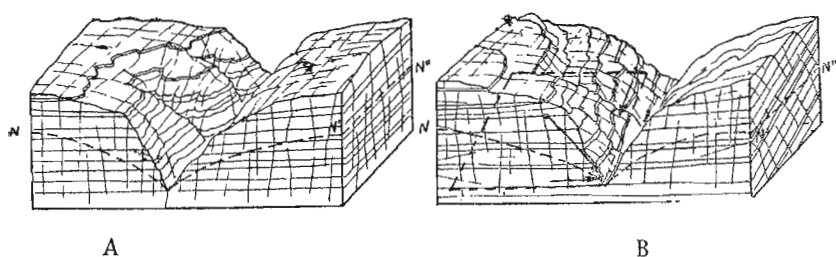


Fig. 6.—N N' N''. Nivel piezométrico cárstico: A. Región tabular, donde el nivel piezométrico cárstico determina la circulación subterránea. B. Región de cuevas, donde el sentido de la circulación es la componente entre el nivel piezométrico y el ángulo de buzamiento

quedaban en la zona semihúmeda de Cvijic (6), por encima del nivel piezométrico normal, cuya ascensión pone en actividad una red hidrográfica subterránea normalmente inerte. Estas transgresiones y regresiones del nivel piezométrico complican enormemente la circulación hipogea, sobre todo a consecuencias de que las «cavernas trop-plein» tienen generalmente muy desarrolladas las formas seniles, clásticas y de reconstrucción, y como consecuencia, la topografía primitiva profundamente modificada por los depósitos clásticos y por la estalagmitización, por cuya razón abundan los sifones y las depresiones cerradas. Durante la transgresión del nivel piezométrico la caverna puede ser completamente inundada y funcionar normalmente, es decir, en un solo sentido; pero durante la regresión el agua tiende a escaparse lo más rápidamente

te posible hacia el nuevo nivel piezométrico estable, lo que realiza siempre por las zonas más bajas de la cueva, y, por lo tanto, se establecen en los «umbrales» de las depresiones cerradas «corrientes difluentes», con lo que se establece una circulación parcial orientada hacia los puntos más bajos que no guarda relación ninguna con el sentido general de la circulación normal hacia el exterior. El resultado morfológico de la regresión es la génesis de for-

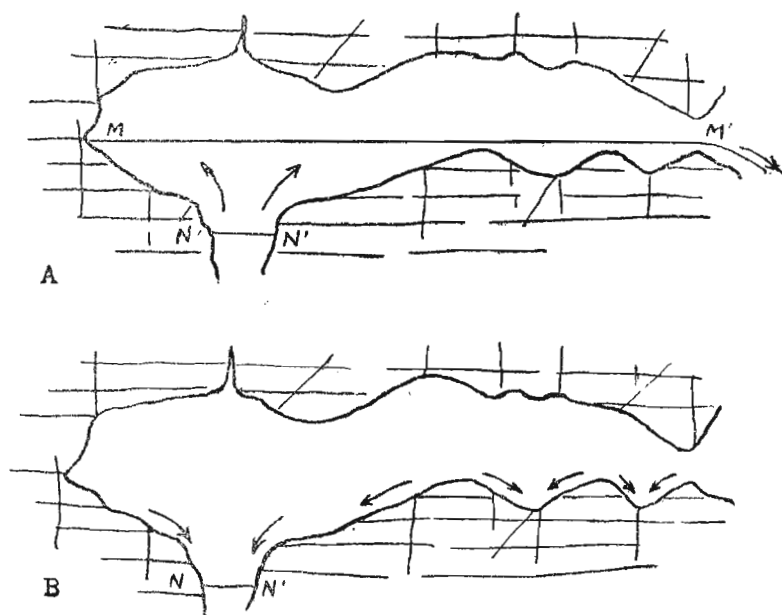


Fig. 7.—Circulación cárstica periódica o intermitente: A. Fase transgresiva. $N N'$ es el nivel piezométrico normal. $M M'$ es el nivel del flujo máximo. B. Fase regresiva. Las flechas indican el sentido de la circulación y la marcha de las corrientes difluentes

mas de erosión que interfieren con las primitivas, pero que se dirigen hacia el fondo de las depresiones.

Estos fenómenos son especialmente perceptibles en los depósitos de arcillas sedimentados durante la transgresión, los cuales aparecen profundamente acanalados después de la regresión. Las cámaras inferiores de la cueva de Villanúa (Huesca), inmediatas al

lago, cubiertas de depósitos arcillosos, muestran bellos ejemplos de huellas de regresión.

Estas oscilaciones del nivel piezométrico de las cavernas no respetan las características antiguas de las cavernas trop-plein, puesto que estos aparatos cársticos, que reemprenden transitoriamente su actividad, pueden haber funcionado de manera muy diferente a como lo hacen durante la transgresión. Así un antiguo sumidero puede funcionar como surgencia, con lo que la superposición de formas de erosión se hace más patente y complica extraordinariamente la morfología primitiva. La gruta de la cueva de Mundo, en las cercanías de Villanúa (Huesca), nos proporciona un ejemplo magnífico a este respecto, puesto que está situada en el fondo de una dolina a 80 metros, sobre el thalweg del Aragón, y todos sus caracteres son los de un «ponor» que hubiese funcionado como sumidero tal vez durante el interglaciar Riss-Würm; no obstante, hoy es el trop-plein de las fuentes de los Borgazos y del pozo de las Yeguas, en los años en que nieva mucho en el macizo de la Magdalena, lo que representa una transgresión del nivel piezométrico de cerca de 100 metros. También la Grotte Favot, en el Vercors (Haute Savoie, Francia) (3) (26), parece haber actuado como caverna trop-plein, puesto que la galería de entrada presenta en la base de sus paredes acanaladuras de lapiaz, cuya morfología evidencia una circulación desde fuera hacia el interior de la caverna.

Todas estas consideraciones nos llevan a una sola conclusión: que la circulación cárstica es extremadamente compleja y que todavía estamos lejos de comprenderla en todos sus detalles.

Laboratorio de Geología de la Universidad.

Oviedo, marzo de 1950.

RESUMÉ

On n'a pas encore établi les vrais rapports entre les formes superficielles du Karst et les formes souterraines. D'après des observations réalisées pendant vingt ans en différents endroits d'Espagne, dans les Causses et dans les Préalpes françaises, on a tenté de faire un essai.

I. *Le cycle karstique et le cycle d'érosion normale* — Dans l'établissement d'une karstification sur un relief calcaire, le type de relief *prekarstique* joue un rôle très important, ce qui permet de diviser les Karst en *Karst de plaine*, *Karst de montagne* et *Karst hybride*. Les Karsts de plaine peuvent s'établir sur des «mesas», sur des pénéplaines et sur des reliefs polycycliques. Le Karst de «mesa» a des cavités élargies selon la verticale par adaptation aux diaclases, comme les cavernes de Bramabiau et de Padirac. Le Karst de pénéplaine s'est adapté à la structure tectonique de l'ancienne montagne; dans le Karst des reliefs polycycliques, on voit une interférence de formes jeunes appartenant à des karstifications des premiers cycles, avec des formes anciennes ce qui explique la présence de formes à différent degré d'évolution sur une même surface. Dans le Karst de montagne, les formes autant superficielles que souterraines s'adaptent à la structure tectonique, mais sont disposées irrégulièrement en accord avec les possibilités du relief. Le Karst de montagne, varie donc, par adaptation aux différents styles tectoniques. Le Karst hybride est le plus courant dans les systèmes karstiques, car d'habitude, dans un pays de plissement par exemple, peuvent se développer différents types de Karst par variation longitudinale et transversale de la structure.

II. *Les phases d'évolution des cavernes et la morphologie souterraine* — On peut envisager un cycle souterrain qui évolue depuis la fissure jusqu'à la fossilisation de la caverne et qui peut comprendre quatre phases primordiales caractérisées par la genèse d'une morphologie particulière à chacune: 1. Phase d'érosion, créatrice de formes d'érosion tourbillonnaire ou formes primitives. 2. Phase de

maturité ou phase d'érosion fluviale. 3. Phase d'effondrement avec génération de formes clastiques (chaos de blocs et cônes de déjection). 4. Phase de stalagmitisation et fossilisation de la caverne. Les dernières phases effacent petit à petit les formes engendrées par les phases antérieures jusqu'à leur totale disparition. Le cycle souterrain peut recommencer après la fossilisation, déterminant un réjeunissement des cavités, c'est à dire, la formation de deux *Karst superposés*.

III. *Considerations sur la circulation karstique*.—Il y a deux types de réseaux souterrains dans le Karst: des *réseaux autochtones* formés dans la masse calcaire par absorption de l'eau par les fissures, et des réseaux *alochtones* qui résultent de l'absorption en masse dans les pertes. Les premiers originent des *surgences*, les deuxièmes des *résurgences*. En tout cas l'apparition de ces sources est toujours conditionnée par le niveau de base local des rivières épigées, mais quelques fois l'existence de couches imperméables intercalées dans la masse calcaire désorganise la marche des eaux provoquant la sortie, en haut des thalwegs épigés.

Dans les pays tabulaires calcaires on peut distinguer des diaclases *absorbantes* et des diaclases *aveugles*, les premières permettant l'infiltration, les deuxièmes l'empêchant; la quantité d'eau infiltrée dépendra donc, de la *densité superficielle* des diaclases béantes et la distribution de l'eau dans les fissures sera conditionnée par ses caractères ce qui explique les différences hydrologiques entre cavernes très voisines.

Dans les pays plissés ou simplement à couches plongeantes, la circulation est déterminée par la composante entre deux forces de sens différent: l'attraction du niveau de base local du cours épigé et le sens du plongement.

On trouve encore une circulation plus compliquée dans les «cavernes trop-plein». Pendant la «transgression» du niveau hydrostatique du Karst la rivière transitoire coule en sens normal, mais pendant la «régression» s'établissent des lignes accessoires d'écoulement vers la profondeur ce qui détermine des formes d'éro-

sion accessoires qui se superposent aux formes normales engendrées par l'écoulement normal.

SUMMARY

The relationship between subterranean and surface Karst formations presents a problem that has not yet been satisfactorily resolved. The explanation offered in this essay is based on observations made during a period of twenty years in various parts of Spain, in the Causses, and the French pre-Alpes.

1. *The karstic cycle and the normal erosion cycle.*—In the karstification of limestone reliefs, the type of relief that existed prior to the karstification plays an important part, and enables Karsts to be divided into three main types, 'mesa', mountain, and hybrid karsts. 'Mesa' type karsts can be formed on plains, *pene-plains*, and polycyclic reliefs. On 'mesas' the karsts are characterized by vertical caves, which follow the joints, as in the Bramabiau and Padirac caves, *pene-plain* karsts follow the tectonic structure of the earlier mountain formations; in polycyclic reliefs, younger formations belonging to the more recent karstification cycles are found among older formations of earlier cycles, so that karsts in different stages of development appear together on the same surfaces. In mountain karsts surface and subterranean formations alike follow the tectonic structure and are therefore disposed according to the nature of the relief. Hybrid karsts are the most common karstic formations since karsts normally evolve in accordance with both the longitudinal and the transversal structures of the territory, as for instance in countries of fold formation.

2. *Evolutionary phases in caves and subterranean morphology.* A subterranean cycle from the original fissure to the final fossilization of the cave may be regarded as passing through four distinct principal phases, each of which has its own morphology. 1) A phase of turbilinear, or primitive erosion. 2) A phase of mature fluvial erosion. 3) A phase during which collapse is accompanied

by the generation of clastic forms in a chaos of blocks and *aluvial cones*. 4) A stalagmitic phase accompanied by fossilization of the cave. During the later phases the formations created by the earlier ones are little by little effaced until they finally disappear. After fossilization, the cycle may begin again at some later period, in which case a rejuvenation of the cave will be brought about and a second karstification superimposed on the first.

3. *Considerations on karst circulatory systems.*—Two types of circulatory systems exist in subterranean karsts, autochthonous systems formed in the limestone mass by the absorption of water through fissures, and alochthonous systems which result from bulk absorption of water through *rifts*. The former originate in *surgences*, the latter in *resurgences*. In both cases however the position of these springs always depends on the basic local epigene riverlevel, although sometimes the existence of impenetrable strata within the limestone mass diverts the water so that it emerges at a level higher than the epigene thalweg.

In *tableland* limestone regions, jains are absorbant, or blind, the former permitting, the latter preventing infiltration, and the quantity of water that passes depends on the superficial density of the *gaping jains*, which this accounts for the hydrological differences between nearby caves.

In regions of fold formation, or simply of *vertical stratification*, circulation of the water is determined in accordance with the product of the opposing forces of the attraction of the local epigene base-level, and the angle of stratification.

An even more complicated circulatory system is found in *trop-plein* caves. The river, during the *transgression* of the water table of the karst flows in the normal direction but during the *regression*, subsidiary channels penetrating in depth are formed, and are responsible for accessory types of erosion, which are superimposed on the normal forms evolved during the period of the normal flow.

BIBLIOGRAFIA

1. Adams, C. S., y Swinnerton, A. C.: *Solubility of Limestone*. «Trans. Am. Geophysical Unión»; parte 11, págs. 504-508; 1937.
2. Baratta, M.: *Morfología e fenomeni del Carso*. Un vol., 133 páginas., 34 láminas.—Pavía, 1917.
3. Bourgin, A.: *Hydrographie karstique. La question du niveau de base*. «Rev. Geogr. Alp.», t. XXXIII, fasc. 1, páginas. 99-107, dos láminas, una figura.—Grenoble, 1945.
4. Cazal, A.: *La rivière souterraine de Bramabiau*; 27 páginas, siete figuras, un plano.—Nimes, 1930.
5. Callegari, M.: *Circolazione superficiale e profonda delle acque nell' Anania*.—Roma, 1934.
6. Cvijic, J.: *Hydrographie souterraine et evolution morphologique du Karst*. *Trav. «Inst. Geogr. Alp. Grenoble»*, vol. VI. número 4, 56 páginas, tres láminas.—Grenoble, 1918.
7. *Das Karstphänomen*, «Geogr. Abh.», V, págs. 217-330.—Berlín, 1893.
8. Chevalier, P.: *Distinction morphologique enere deux types d'erosión souterraine*, «Rev. Geogr. Alpine», XXXII.—Grenoble, 1944.
9. Davis, W. M.: *Origine of limestone caverns*. «Bull. Soc. Geol. Amer», volumen 41, páginas 486-499.—Wáshington, 1930.
10. Falot, P.: *Etude géologique de la Sierra de Majorque*. *Tbèse*.—París, 1922.
11. Faura Sans, M.: *La Espeleología en Cataluña*. «Mem. R. Soc. Esp. Hist. Nat», tomo VI, número 6, páginas 425-592, láminas XX-XXVII, 30 figuras.—Madrid, 1910.
12. Fourmarier, P.: *Hydrogeologie*.—Liège, 1936.
13. Gardner, J. H.: *Origin and development of limestone caverns*. «Bull. Geol. Soc. Am.», vol. 46, páginas 1255-1274; 1935.
14. George, P.: *La région du Bas Rhône*. *Tbèse*, un vol.—París, 1935.
15. Géze, B.: *Influence de ta tectonique sur la localisation des sources vauclusiennes*. I Congr. Nat. Speleologie, 12 págs., seis figs.—Nimes, 1939.

16. *La capture souterraine du Thoré (versant atlantique) par le Jaur (versant méditerranéen)*. «Ann. de Speleologie», t. III, fasc. 4, págs. 233-242, 4 figs.; 1948
16. bis. *Grund: Die Karsthydrographie*.—Leipzig, 1905.
17. *Hollister, J. S.: Die Stellung der Balearen im variscische und alpinen Orogen*. «Beitr. Geol. West. Med. Geb. Abh. Gess. Wiss. Göttingen Math-Phys Kl.», III F., H. 10.—Berlín, 1934.
18. *De Launay, M., et Martel, E. A.: Note sur quelques questions relatives á la géologie des grottes et des eaux souterraines*. «Bull. Soc. Geol. Franc.», vol. XIX, páginas 142-165, 18 figuras.—París, 1890-91.
19. *Lautensach, H.: Excursión morfológica a Cuenca y a la Ciudad Encantada*. «Bol. R. Soc. Geogr.», t. LXXII, págs. 67-75, 3 figs.—Madrid, 1931.
20. *Lehmann: Die Hydrographie des Karstes*, Encyclopädie der Erdkunde.—Wien, 1932.
21. *Llopis Lladó, N.: Morfología e hidrología subterránea de la parte oriental del macizo cárstico de Garraf (Barcelona)*. «Est. Geogr.», año II, números 4-5, páginas 413-466, 15 figuras, cuatro láminas.—Madrid, 1941.
22. *Estudio geológico del valle del Congost (Barcelona)*. «Publ. Inst. Geol. Dip. Prov» vol. V, 102 págs., 12 láms., 25 figs., un mapa.—Barcelona, 1942.
23. *Morfología de los relieves de puddingas de San Lloréns de Munt-Sierra de l'Obac (Barcelona)*. «Est. Geogr.», año V, número 17, págs. 687-814, 28 figuras, 10 láminas, un mapa.—Madrid, 1945.
24. *La cueva de Son Apats (Campanel-Mallorca)*. «Bol. C. M. B.»; febrero, 1945; páginas 267-268, una fig.—Barcelona, 1946.
25. *Contribución al conocimiento de la morfoestructura de los Catalánides*. Un volumen, 372 páginas, 40 figuras, 22 láminas.—Barcelona, 1947.
26. *La I Reunión Internacional de Espeleología en Valence-sur-Rhône (Francia)*. (En publicación).
27. *Estudio hidrogeológico de la sierra de Berti (Barcelona)*. (In. lit.)
28. *Llopis, N., y Bescós, A.: Garraf*. Un vol. en 8.º, 24 páginas, un mapa.—Barcelona, 1949.
29. *Llopis, N., y J. G. de Elarena: Estudio geológico de la caverna de Trosqueta kokobea (Alaun, Guipúzcoa)*. «Munibe», año I, número 4, páginas 153-179, cinco figuras, un plano.—San Sebastián, 1949.
30. *Llopis, N., y Thomas Casajuana, J. M.: Los fenómenos cársticos del cerro de Sant Miquel de Campanel (Jaca-Mallorca)*. «Misc. Almera», volumen II. Barcelona, 1947.
31. *Malott, C. A.: The invasion theory of cavern development*. «Proc. Soc. Geol. Am.», páginas 323; 1937.
32. *Marchi, De: L'acque di Carso*. «Scientia», vol. XX; 1916.

33. *Martonne, E. de: L'hydrographie du Karst.* «Annales de Geogr.», número 237. París, 1933.
34. *Martel, E. A: L'évolution souterraine.* Un vol., 388 págs., 89 figs.—París, 1908.
35. *Causses et Gorges du Tarn.* Un vol.—Millau, 1926.
36. *Les abimes ou puits naturels.* «Assoc. Int. Hydrol. Sc.», número 19, seis páginas.—París, 1932.
37. *Les causses majeurs.* Un vol., un mapa.—Millau, 1936.
38. *Padirac, bistoire et description sommaire.* In 8.º, 32 págs., 32 fit.—St. Cé-
ré, 1949.
39. *Solé, L., y Llopis, N: La terminación septentrional de la cordillera costera catala-
na.* «Geol. Med. Occ.», t. VI, número 1, 87 páginas, 22 figuras, un ma-
pa.—Barcelona, 1939.
40. *Swinnerton, A. C: Origin of limestone caverns.* «Bull. Geol. Soc. Am.», vol. 43,
páginas 663-693; 1932.
41. *The hydrology of limestone terraces.* Chap. XIV, de «The Physics of the
Earth», vol. IX; 1940.
42. *Structural control of the form and distribution of sinkholes.* «Science», vol. 85,
páginas 218-219; 1937.
43. *Telman, C. F.: Ground water.* Un vol., 593 páginas, 189 figs.—New York
and Loadon, 1937.