



**UNIVERSIDAD
PARA TODOS**

**El mundo
subterráneo**

PRECIO: \$ 2.00

COORDINADOR GENERAL

Geol.BSc. Leslie F. Molerio León

VICECOORDINADORAS:

MSc. Marjorie Mahe Condís

Lic. Marilú Labrada Cortés

AUTORES

Geol. BSc. Leslie F. Molerio León

Geol. Evelio Balado Piedra

Cnel. Ing. Pedro J. Astráin Rodríguez

Tte. Cnel. Carlos Aldana Vilas

MSc. Racso Fernández Ortega

Lic. Roberto Gutiérrez Domech

Lic. Efrén Jáimez Salgado

Dr. Juan R. Fagundo Castillo

Lic. José B. González Tendaro

Ing. Rafael M. Lavandero Illera

Ing. Jesús Martínez Salcedo

MSc. Marjorie Mahe Condís

Dr. Luis F. De Armas

Prof. Jorge L. Clinche Crego

Lic. Jesús Pajón Morejón

MSc. Enrique Dalmau Hevia

MSc. Tania Crespo Díaz

Lic. Angel Graña González

Dr. Ercilio Vento Canosa

Geol. Mario G. Guerra Oliva

Lic. Alejandro Romero Emperador

MSc. María del Carmen Martínez Hernández

MSc. Augusto Martínez Zorrilla

COLABORADORES

Prof. Fernando Andreu

Lic. Ramsel Arencibia

Ing. Carlos Borrego

Dra. Fabiola Bueno

Lic. Adrián de la Paz

Dr. Cristóbal Díaz

Dr. Luis R. Díaz Cisneros

Lic. Argelia Fernández

Lic. Gabriel García Pulpeiro

Arq. Elena Guarch Rodríguez

Arq. Juan Guarch Rodríguez

Prof. José Hernández Carabeo

Dr. Manuel A. Iturralde-Vinent

Lic. Eduardo Labrada

Lic. Osmar Labrada

Dr. Juan A. Montaña Hirose

Lic. Vladimir Otero Collazo

Lic. Abel Pérez González

Dr. Carlos Rangel

Prof. Manuel Rivero Glean

Lic. Caridad Rodríguez

Dra. Herminia Serrano

Ing. Fabio Siccardi

Lic. Gilberto Silva Taboada

Dra. María del Carmen Solís

Prof. Manuel Suárez Valdés

Lic. Ciro Torres

Dr. Abel Vale

Dr. Nicasio Viña-Bayés

Dr. Nicasio Viña-Dávila

Kevin Downey (Fotógrafo-NSS)

David Bounell (Fotógrafo-NSS)

AGRADECIMIENTOS

Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

Asociación Internacional para la Conservación de los Murciélagos (BCI, Inc.)

Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD)

Asociación Mundial de Conservación de Agua y Suelo (WASWC)

Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental (CIGEA)

Centro Nacional de Educación Sexual de Cuba (CENESEX)

Centro Nacional de Termalismo (CNP)

Centro Provincial de Patrimonio Cultural de La Habana

Centro Turístico Cueva de Ambrosio, Matanzas

Centro Turístico de las Cuevas de Bellamar, Matanzas

CESIGMA, S.A.

Comités espeleológicos provinciales de Pinar del Río, Matanzas,

Camagüey y Holguín, de la Sociedad Espeleológica de Cuba

Corporación CIMEX

Delegación Provincial del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio

Ambiente en Matanzas

Dirección de Medio Ambiente, (CITMA)

Í N D I C E

INTRODUCCIÓN / 3

CARSO Y CUEVAS / 3

MEDIO AMBIENTE CÁRSICO / 3

REGIONES, SISTEMAS, APARATOS, ZONAS Y FORMAS CÁRSICAS / 4

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO DEL MEDIO AMBIENTE SUBTERRÁNEO / 4

CALIZAS / 5

PROCESOS DE CARSIFICACIÓN Y CAVERNAMIENTO / 5

Disolución de las rocas / 6

Disolución de los carbonatos en presencia de otros iones / 6

Cinética y velocidad de disolución de los carbonatos / 6

Corrosión mediante procesos microbiológicos y bioquímicos / 6

Procesos de mezcla de agua por intrusión marina en acuíferos cársicos / 7

ORIGEN DE LAS CAVERNAS / 7

RELIEVE CÁRSICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO / 7

Grupos de formas del relieve cársico superficial / 7

EVOLUCIÓN DEL CARSO Y LAS CUEVAS / 10

COMPONENTES DEL MEDIO AMBIENTE SUBTERRÁNEO / 10

Nivel físico / 11

Nivel biótico / 12

Nivel socioeconómico / 13

TÚNELES: UN CASO PARTICULAR DE CAVIDAD ARTIFICIAL / 15

Breve historia de la construcción subterránea / 15

Cavidades artificiales y el sistema soporte / 16

CARSO Y YACIMIENTOS MINERALES SÓLIDOS EN CUBA / 17

Bauxitas / 17

Manganeso / 17

Arcillas / 17

Fosforita / 17

Calcedonia y Ópalo / 17

Turba / 18

Guano / 18

SUELOS DE LAS REGIONES CÁRSICAS DE CUBA / 18

DEGRADACIÓN DEL MEDIO SUBTERRÁNEO / 19

USO SOSTENIBLE DE LAS FORMAS CÁRSICAS / 19

Patrón combinado / 19

Aborígenes de Cuba / 20

Cimarrones / 20

EFFECTOS DEL USO DEL CARSO Y LAS CUEVAS SOBRE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS / 20

EXPLORACIÓN Y DOCUMENTACIÓN ESPELEOLÓGICA: HACIA UNA ESPELEOLOGÍA SOSTENIBLE / 21

Mínimo Impacto de la Exploración Espeleológica (CMI) / 21

Reglas básicas de la exploración espeleológica / 22

ALGUNOS ASPECTOS ÉTICOS DE LA EXPLORACIÓN SUBTERRÁNEA / 22

DOCUMENTACIÓN ESPELEOLÓGICA. LA PRIMERA FASE DE LA PROTECCIÓN DEL MEDIO SUBTERRÁNEO / 23

TOPOGRAFÍA SUBTERRÁNEA / 23

Instrumentos y materiales más utilizados en la topografía espeleológica / 23

Trabajo topográfico en una caverna / 23

Representación gráfica de una caverna / 24

Utilización de las computadoras (PC), en la topografía de las cavernas / 24

PROGRESIÓN VERTICAL / 24

PROGRESIÓN EN CONDUCTOS INUNDADOS: ESPELEOLOGIA SUBACUÁTICA / 25

Tipos de cavidades inundadas / 25

Peligros comunes y específicos en la exploración de cavidades inundadas / 25

REGLAS ELEMENTALES DE SEGURIDAD / 25

USO DE TRAZADORES / 26

FOTOGRAFÍA DE LAS CAVERNAS / 26

Cámaras / 26

Tipos de fotos / 27

Iluminación / 27

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL DE LAS CUEVAS / 27

Calidad del aire subterráneo / 27

Flora y fauna subterránea / 27

Estabilidad de la caverna / 27

Régimen y calidad de las aguas / 27

MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES / 27

FÓSILES EN LAS CUEVAS / 28

HISTORIA DE LA ESPELEOLOGÍA EN CUBA / 28

PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE SUBTERRÁNEO / 30

Medidas estructurales y no estructurales: aspectos jurídicos y educación ambiental / 30

Conservación del patrimonio espeleológico / 31

Conservación del patrimonio paleontológico / 31

Protección de los sitios arqueológicos / 31

Aspectos éticos y de conservación en el espeleobuceo / 32

Interrelación del hombre con los ecosistemas cársicos / 32

Escuela Nacional de Espeleología
Federación Australiana de Espeleología (ASF, Inc)
Federación Española de Espeleología (FEE)
Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe (FEALC)
Federación Italiana de Espeleología (FIS)
Fundación Antonio Núñez Jiménez de la Naturaleza y el Hombre (FANJ)
Instituto de Aguas Cársicas (KWI)
Instituto de Ecología y Sistemática (IES)

Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA)
Instituto de Geología y Paleontología (IGP)
Instituto Carlos J. Finlay
Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias
Rumbos, S.A.
Sociedad Espeleológica de Cuba
Sociedad Venezolana de Espeleología (SVE)
Unión Internacional de Espeleología (UIS)

GRUPO DE EDICIÓN EDITORIAL ACADEMIA

Edición: Lic. Noelia Garrido Rodríguez

Diseño y tratamiento de imágenes: Marlene Sardiña Prado

Corrección editorial: Caridad Ferrales Avín

2004, Año del 45 Aniversario del Triunfo de la Revolución



INTRODUCCIÓN

En 1955, la Sociedad Espeleológica de Cuba impartió el primer Curso de Espeleología General que se ofreciera en Cuba. A finales de la década de 1980, un impresionante movimiento masivo de centenares de espeleólogos, con el apoyo del Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias, recibió una formación básica en las escuelas provinciales de Espeleología y, de especialización, en la Escuela Nacional de Espeleología.

Sin embargo, aún no se podía prever que la originalidad en la búsqueda de nuevas formas de masificar la cultura llegaría a disponer de todo un sistema de televisión para contribuir a la formación cultural integral de nuestro pueblo. Hacer llegar, a todos los ciudadanos, los conocimientos básicos para proteger el impresionante patrimonio espeleológico del país y los recursos naturales del carso cubano. Ofrecerles las herramientas para conservar adecuadamente miles de cuevas, el legado aborigen, cimarrón, mambí y rebelde de nuestra historia, el patrimonio de la fauna y la flora fósil cubanas y prácticamente todos los recursos de agua subterránea, distribuidos en un paisaje singular, exclusivo y hermoso, que abarca casi 70 % del país. La Sociedad Espeleológica de Cuba (SEC) y la Agencia de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, con profundo amor y seriedad han preparado este curso para contribuir a elevar la cultura de la naturaleza como parte integral de la cultura de nuestro pueblo. Se terminó en el año 2003, de aniversarios tan importantes como el 150 del nacimiento de Martí, aquel para quien *un pensamiento justo desde el fondo de una cueva puede más que un ejército*, el 50 del Moncada, que permitió una Revolución que, como dijera Fidel, *cuando tengamos que defenderla iremos también a buscar la Naturaleza... por eso vemos con buenos ojos que los jóvenes exploren las grutas...*

Este curso, coincide con el 81 aniversario del natalicio del fundador de la Sociedad Espeleológica de Cuba, Dr. Antonio Núñez Jiménez. Al presentarlo, repetimos como él que, *por eso los miembros de la Sociedad Espeleológica nos sentimos felices, porque hemos dado a nuestro pueblo nuestra ciencia y nuestro pensamiento revolucionario, para hacerlo más dichoso, para hacerlo más feliz...*

En su homenaje, queremos dedicarlo a todos los espeleólogos caídos en defensa de la libertad y la justicia, los más nobles ideales del hombre.

CARSO Y CUEVAS

Un mundo fascinante se extiende bajo nuestros pies. Miles de kilómetros de galerías subterráneas formadas por la lenta acción de las aguas superficiales y subterráneas contienen un universo de increíble belleza e inigualable riqueza natural y social lejos aún de ser conocido y explorado. La última frontera del descubrimiento. Las cuevas y las cavernas, están siempre asociadas a la historia de la humanidad, en cualquier rincón del planeta y en cualquier época. Venerado o temido, el mundo subterráneo es uno de los ambientes naturales más extraordinarios que existen en nuestro planeta. Su singular fauna y escasa flora, su riqueza cultural, los importantes recursos minerales e hidráulicos convierten al medio ambiente subterráneo en uno de los entornos más frágiles y vulnerables que existen en la Tierra.

Aún cuando hay cavernas en muchísimas rocas diferentes, como las volcánicas y metamórficas, en este curso trataremos, en específico, aquellas cavernas que se desarrollan en las rocas calizas, las rocas sedimentarias más abundantes del planeta y que forman un particular tipo de relieve llamado Karst o Carso.

El *carso* es un fenómeno universal. Ello se debe a que las rocas carbonatadas—principalmente calizas y dolomitas—donde estos fenómenos tienen lugar, constituyen 15 % de todas las rocas sedimentarias y subyacen 75 % de la superficie del planeta. Algunos autores consideran que entre 15 y 20 % de las tierras emergidas están, en mayor o menor grado, carsificadas. De este modo, el carso ocupa una superficie aproximada de 50 000 000 de kilóme-

tros cuadrados de la superficie terrestre, en los más variados climas y regiones. Se denomina Karst o Carso al conjunto de fenómenos y procesos caracterizados por el predominio de la disolución y la corrosión, y ocurren bajo la acción del agua en las regiones compuestas, principalmente, por rocas solubles, como calizas, yeso y sal.

Jennings (1971) ha definido el paisaje cársico como *de morfología distintiva, que presenta primariamente una alta y anormal solubilidad de las rocas, incluso en terrenos donde los procesos tales como la acción mecánica de los ríos y la de los hielos juegan un papel significativo y dominante, a pesar de que dichos procesos no son exclusivos del carso*. El vocablo *karst* es la versión germánica de la palabra de origen esloveno *kras* que significa “campo de piedras calizas” y que ha sido aplicada para definir paisajes “similares” a los de la Meseta del Carso (Kras), región de los Alpes Dináricos, ubicada entre las antiguas repúblicas yugoslavas de Eslovenia y Croacia y en parte Trieste, al norte del Mar Adriático, en Italia. La expresión eslava proviene a su vez del celta o precelta “kare”, o del indoeuropeo “krs” que significa desierto de piedra. En castellano se considera correcto utilizar el término “carso”.

La región del Cibao, en República Dominicana, es un territorio altamente carsificado, habitado por los primitivos arawacos 5 000 años antes de nuestra era. Los mayas de la cársica región de Yucatán no parecen haber denominado su país atendiendo a estos fenómenos, pero dejaron su impronta en el término *d’zonot*, cenote, incorporado, como sinónimo de *blue-hole* o *casimba*, para designar aquellas depresiones inundadas de aguas subterráneas, muchas veces conectadas con grandes cavernas horizontales, y que constituyen una de las más impresionantes morfologías cársicas del mundo. Asimismo, de las antiguas lenguas indoeuropeas se han incorporado al léxico del carso términos como *dolina*, *ponor*, *uvala*, *polje* que hoy tienen un particular sentido geomorfológico, geológico e hidrogeológico.

En algunos casos, muy pocos por cierto, el carso es un fenómeno local de poca significación pero, en muchos países las rocas carsificadas ocupan áreas importantes o tienen cierta relevancia económica, por ejemplo, la antigua Yugoslavia, Estados Unidos, España, Francia, Jamaica, Puerto Rico y Cuba. Existen países, sobre todo insulares, como Barbados o Bermuda, cuya superficie está ocupada, totalmente, por rocas carsificadas.

Cualquier acción que se emprenda sobre un sistema natural presupone el conocimiento de su comportamiento ante el estímulo, en aras de prever de manera adecuada sus consecuencias. El carso es un sistema natural que se caracteriza, ante todo, por su vulnerabilidad y fragilidad.

No solo como fuente de conocimiento primario, sino por la necesidad de actuar en beneficio de las economías nacionales se impone disponer de un claro concepto del carso y de los procesos que en él tienen lugar. Numerosos países en vías de desarrollo poseen vastas extensiones de sus territorios ocupadas por rocas carsificadas, de manera que el carso tiene cierto peso en la conformación de sus economías y, por ende, debe ser evaluado con rigor y seguridad suficientes como para permitir realizar pronósticos certeros de su utilización.

Desde el punto de vista hidrológico, el carso es de una importancia excepcional. En Cuba, por ejemplo, 65 % de la superficie del país está carsificada y, de los 6,3 km³ de recursos de agua subterráneas de que dispone, 80 % se encuentra en estos territorios. Sin embargo, a escala mundial, las regiones cársicas exhiben grandes contrastes. Pueden encontrarse tanto inmensas reservas de agua subterránea como gran escasez de ellas, e incluso, zonas áridas; abundantes recursos minerales, de petróleo y gas o una absoluta pobreza de ellos; terrenos fértiles, aptos para el cultivo o tierras baldías. El aprovechamiento del carso implica el conocimiento de las leyes que rigen su funcionamiento. En este caso, se trata de un sistema dinámico, por cuanto éstos se definen como aquellos en que tienen lugar procesos de transporte de masa y energía.

En efecto, *el carso se origina como consecuencia de complejos mecanismos de erosión, entendida ésta en su sentido más amplio, transporte y deposición de los resi-*

duos, dentro o fuera del macizo carbonatado. El agua—superficial y subterránea—actúa como agente de transferencia en los procesos, de manera que la dinámica general de la carsificación se centra en el modo en que se organiza, distribuye y desarrolla el movimiento de las aguas.

Características morfológicas e hidrológicas que hacen de los relieves cársicos un entorno singular:

1. Ausencia de valles verdaderos, los que están sustituidos por otras formas negativas de relieve, que reciben nombres particulares: dolinas, poljes, uvalas, entre otros.
2. Red de drenaje superficial que, aunque de variables dimensiones, por lo general está mal desarrollada, distorsionada a trechos y donde la mayor parte de los ríos tienen cursos parcial o totalmente subterráneos.
3. Red de drenaje subterránea de compleja configuración, regida por leyes hidrodinámicas particulares, o con acuíferos muy típicos, en ocasiones extensos y profundos, pero otras veces discontinuos, con singulares condiciones de alimentación, movimiento y descarga.
4. Sedimentos autóctonos de cobertura muy permeables, de variable potencia y, en ocasiones, inexistentes, aflorando la roca desnuda.
5. Desarrollo subterráneo de una amplia red de canales y conductos intercomunicados, con longitudes desde pocos centímetros hasta centenares de kilómetros.

Existen también morfologías similares a las cársicas que no se producen por esas causas y que algunos autores han denominado pseudocarso, aunque la Naturaleza no origina falsos procesos. Estos son:

Termocarso. Carso en hielo, producido por la fusión alternada de este elemento en climas árticos y alta montaña.

Cryocarso. Carso en hielos perennes, producido por la fusión continua de los hielos de los glaciares.

Clastocarso. Modelado en conglomerados, arcillas, grauvacas, loess y materiales fundamentalmente clásticos, por procesos de sufusión (socavamiento).

Vulcanocarso. Desarrollado en piroclastos y materiales volcánicos frescos.

Criptocarso. Relieve cársico cubierto por sedimentos no consolidados pero que no fosilizan al sistema, sino que continúa funcionando hidrológicamente, como es el caso de la Llanura Meridional de Pinar del Río.

Otros ejemplos de carso en rocas no solubles se encuentran en Cuba y otras partes del mundo en: peridotitas y serpentinitas; ópalo y calcedonia; granitoides; andesitas y basaltos. Mención especial merece el carso de las cuarcitas de la Formación Roraima, de la Guayana venezolana, donde se han desarrollado enormes simas y cavernas en los ya famosos tepuis.

MEDIO AMBIENTE CÁRSICO

El ecosistema subterráneo es la porción de la corteza terrestre suficientemente cerca de una cueva para tener algún efecto sobre, o ser afectada por la existencia de ésta. Se reconocen tres subsistemas: aéreo, terrestre y acuático. Las relaciones entre ellos son muy fuertes, sobre todo en los dos últimos.

Los terrenos cársicos fueron de las primeras regiones del mundo en recibir influencias adversas de la actividad humana. Las rocas carbonatadas rodean gran parte del Mar Mediterráneo y las primeras civilizaciones localizaron muchos de sus asentamientos en las mesetas y llanuras elevadas de la cuenca mediterránea. Estas áreas eran más atractivas que los humedales litorales, terrenos bajos, cerca de los ríos o el mar, infectados de insectos y enfermedades. Los habitantes primitivos no tenían claras las consecuencias de ocupar las regiones cársicas. Pero los terrenos cársicos son sitios muy adecuados para el desarrollo de la minería, la energía y los recursos hidráulicos. Su vulnerabilidad y fragilidad son tales que responden más rápida, dramática e irreversiblemente a los impactos ambientales que otro tipo de terrenos.

El carso no es ajeno a los mismos elementos de estrés ambiental que otras regiones. La degradación provocada



Fig. 1. Paisaje cársico de montaña “mogotes”.

por el incremento de la población, la expansión urbana y suburbana, y el incremento en la demanda de recursos limitados afectan de manera muy singular a estas regiones.

Una de las características que hace al carso un entorno extremadamente frágil y susceptible a la degradación ambiental es la erodabilidad de los delgados suelos que se desarrollan sobre las rocas. En cuanto estas áreas comenzaron a deforestarse, la vegetación que mantenía el suelo en su lugar, fue destruida. En consecuencia, el suelo fue removido por erosión o lavado y trasladado hacia las cavernas. La pérdida de suelo contribuyó a dificultar la infiltración de las aguas de lluvia que alimentaban las aguas subterráneas y, como resultado, muchos manantiales se secaron y los ríos perdieron parte de su caudal.

Esa sensibilidad de los terrenos cársicos hace que los efectos de las diferentes prácticas de uso de la tierra se observen con facilidad. Prácticas agrícolas inadecuadas y el uso impropio de las aguas superficiales y subterráneas, el continuado vertimiento de residuales sólidos y líquidos han impactado de manera desfavorable el medio cársico, reducido su diversidad biológica, en particular la subterránea, disminuido sus recursos naturales y provocado efectos negativos casi irreversibles, en muchos casos. Precisamente el adecuado aprovechamiento y protección de los recursos naturales de las regiones cársicas motiva que el buen funcionamiento de los sistemas hidrológicos, geológicos y biológicos no sea sólo deseable, sino necesario, para poder explotarlos con eficiencia. Los recursos naturales del carso han tenido y poseen, un efecto significativo sobre el desarrollo social y económico de muchos países, por eso, el impacto negativo de su uso tiene que ser minimizado para garantizar la sustentabilidad de su utilización. Entre estos recursos naturales, el más importante es el agua para el consumo doméstico, industrial y agrícola.

El pintoresco escenario del carso, sus impresionantes sistemas de cavernas y ríos subterráneos y las hermosas reconstrucciones interiores constituyen un patrimonio natural de notable interés turístico. La infraestructura que requiere la adaptación de las cavernas para su uso turístico incluye iluminación eléctrica, construcción de senderos y caminos, paseos en bote, conciertos y presentación de obras teatrales. Por otro lado, las cuevas son utilizadas, en países de clima templado y tropical para el cultivo de hongos comestibles, el envejecimiento de los vinos y quesos y el almacenamiento de productos del petróleo. La explotación de los recursos minerales, abundantes en muchas regiones cársicas provoca serios impactos negativos. Si bien las calizas se han utilizado desde tiempo inmemorial como material de construcción, otros minerales no menos importantes como el petróleo, manganeso o bauxita son típicos de regiones cársicas sometidas, sistemáticamente, a un deterioro ambiental incuestionable.

El aprovechamiento de las regiones cársicas y sus recursos también exhibe varios tipos de peligros y proble-

mas ingenieros. Estos últimos incluyen la subsidencia del terreno, hundimientos de bóvedas de cavernas, afloramiento de agua o coladas de fango durante las excavaciones, deslizamientos de terreno o desprendimientos de rocas, contaminación de las aguas dulces subterráneas por las aguas del mar, la filtración de embalses y la perforación de pozos no fértiles o improductivos.

La impresionante y heterogénea red de canales y conductos subterráneos que caracterizan las regiones cársicas hace que los efectos de la contaminación de las aguas sean difíciles de pronosticar y complejos de remediar. Las altas velocidades que pueden alcanzar las aguas en los ríos subterráneos trasladan las sustancias contaminantes

muy lejos, a veces, del foco de contaminación, y afectan con rapidez extensas áreas.

REGIONES, SISTEMAS, APARATOS, ZONAS Y FORMAS CÁRSICAS

Se define como una región cársica, aquella unidad morfoestructural e hidrológica del relieve, caracterizada por procesos morfogenéticos comunes, similares condiciones de organización del escurrimiento superficial y de alimentación, movimiento y descarga de las aguas subterráneas.

De este modo, los elementos que permiten individualizar una región cársica, dentro de una misma zona climamorfogenética son:

- Estructura geológica.
- Morfogénesis del relieve.
- Régimen hidrodinámico.

Para la completa descripción de la región, se introducen los indicadores siguientes:

- Patrón del carso.
- Tipología de los sedimentos de cobertura.
- Carácter evolutivo del carso.
- Tipología y funcionamiento hidrológico de las formas cársicas elementales.

Las divisiones menores son:

- Sistema cársico, unidad morfogenética e hidrológica.
- Aparato cársico, unidad morfológica e hidrológica.
- Forma cársica, elemento del relieve que cumple determinada función hidrológica, como la absorción, conducción o descarga.

La zona cársica engloba, en tiempo y espacio, conjuntos de formas que cumplen una función hidrológica específica. Así, se definen, las zonas de absorción, conducción o almacenamiento y descarga del carso. El término sistema, sin embargo, se emplea con una acepción mucho más amplia, para designar el entorno cársico. Su uso, generalizado de la Teoría del Análisis de Sistemas es, además de ventajoso, muy práctico.

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO DEL MEDIO AMBIENTE SUBTERRÁNEO

El hombre siempre mostró interés por las cavernas. Fueron ellas sus primeras habitaciones, templos y cementerios. Desde tiempos remotos, las cavernas han estado ligadas a la historia de la humanidad y siempre, el hombre ha intentado explicar las maravillas del mundo subterráneo.

Las primeras exploraciones espeleológicas que se tiene noticias son las efectuadas por el rey asirio Tiglath Pileser, que explora las surgencias del Tigris, en el actual

Kurdistán, en el año 1100 a.n.e. El rey Shalmanaser III la continuó, 250 años más tarde.

En el libro *Pao Phu Tzu*, escrito por el chino Ko Hung en el año 300 a.n.e. se describe, por primera vez, el uso terapéutico de algunos depósitos formados por sedimentación en las cavernas. Pero fue el filósofo griego Aristóteles (384-322 a.n.e.) quien elaboró una de las primeras teorías sobre el origen de las cavernas y su papel hidrológico, al considerar que, en las cavernas, el aire de la Tierra se comprimía y se transformaba en agua, goteando por las estalactitas.

Las cuevas eran consideradas, entonces, como morada de los dioses, símbolo de fertilidad o, incluso, un sitio vinculado con el origen del hombre.

En 1654, Johann Gaffarel publicó su obra *Le Monde Souterrain* (El Mundo Subterráneo), del que quedan algunos fragmentos en la Biblioteca Nacional de París. Los tipos de cuevas de Gaffarel eran las *Divinas, Humanas, Animales, Artificiales y Naturales*.

Athanasius Kircher publicó, en 1678, una obra con el mismo título que la de Gaffarel, la cual se ha conservado. Kircher, fraile jesuita, fue un gran divulgador de los conocimientos científicos de su época y autor de la idea de la *hidrofilacia*, según la cual, las grandes cuencas de agua subterránea son alimentadas, desde el mar, por sifones y luego drenados por manantiales cársicos que provocan la inundación de los poljes.

Johann Weichard Valvasor (1641-1683) publicó en Nuremberg (1689) una descripción, en cuatro tomos (2871 páginas), de la región de Kranjska, en Croacia, en la que dedica especial atención a las cuevas, ríos subterráneos, relaciones subterráneas entre los sumideros y los manantiales y a los lagos estacionales. Fue el primero en reconocer el papel de las aguas en la formación del carso. Gruber (1781) definió que las aguas subterráneas son las responsables del intemperismo de las rocas carbonatadas, del alargamiento de las cavidades subterráneas y de la subsidencia en superficie. Las simas *jamás* y dolinas se forman a causa de ello. Jacquet (1778-1789) atribuyó el origen de las depresiones cerradas de las regiones del carso dinámico al intemperismo superficial.

El *periodo clásico* (1873-1930) está caracterizado por los trabajos de Tietze, uno de los primeros en destacar la complejidad de los procesos de carsificación y la importancia que para ello tenían la composición de la roca, erosión, disolución química y la subsidencia. Gujia Pilar fue el primer investigador que se dedicó, sistemáticamente, al estudio de los aspectos teóricos y prácticos del abastecimiento de agua en el carso. Resumió sus estudios en un trabajo clásico, publicado en Zagreb, en 1874: *Tratado sobre el abastecimiento de agua en el carso de Croacia*. Pilar fue el primero en oponerse a la idea de que el agua en el carso circulaba exclusivamente por conductos preferenciales.

PRIMERAS ASOCIACIONES ESPELEOLÓGICAS DEL MUNDO

- **1879:** *Sociedad Espeleológica de Austria* (Austria-Hungría)
- **1883:** *Comisión de Grutas de la Sociedad Alpina de Las Julias* (Italia)
- **1892:** *Yorkshire Rambler's Club*
- **1895:** *Sociedad Espeleológica de Francia* (Francia)
- **1910:** *Sociedad Espeleológica de Lubiana* (Austria)

En 1893 Cvijic publicó, en Stuttgart, *Das Karstphänomen*, el intento más serio de explicar, de manera integral, el desarrollo de las formas cársicas. Aunque Cvijic lo consideró modestamente “un intento de monografía geomorfológica”, en ese trabajo se sentaron las bases, definitivamente, de la moderna geología, geomorfología, hidrología e hidrogeología de las regiones cársicas.

Los años finales del siglo XIX marcan el inicio de la primera gran etapa del estudio hidrogeológico de uno de los medios acuíferos agrietados más controvertidos: el carso. Dos figuras, contemporáneas y polémicas en sus

apreciaciones, crearon las bases del estudio sistemático del drenaje cársico: Jovan Cvijic y Eduardo Alfredo Martel. En la penúltima década de ese siglo, Cvijic comienza los más rigurosos estudios del llamado Carso Dinárico, y en su citada publicación *Das Karstphänomen*, trabajo en el que se expusieron las primeras y brillantes ideas sobre hidrogeología cársica, con observaciones tan serias e importantes que en sus líneas generales no se han cambiado y hoy constituyen conceptos básicos sobre los que se apoyan nuestros conocimientos sobre Hidrogeología del Carso (Llopis, 1970). Otra de sus obras clásicas fue *Hydrographie souterraine et evolution morphologique du Carso*. Quizás el mejor análisis de las ideas de Cvijic fue el elaborado, en su momento, por Roglic (1965). Aproximadamente en la misma época, Eduardo Alfredo Martel funda la Sociedad Espeleológica de Francia, la primera del mundo, sentando —con ello— las bases de la moderna Espeleología. Entre sus obras más destacadas merecen citarse *Les Abismes* (1893), *L'évolution souterraine* (1908), *La France ignorée* (1928) y *La Spéléologie au siècle XX*, publicadas hacia el final de su vida.

En buena medida, el llamado “problema del origen de las cavernas” derivó importantísimas consecuencias respecto al conocimiento del origen y la evolución del medio ambiente de las cavernas.

Dos problemas capitales centraron la atención de los investigadores: la aclaración de la presencia o no de un nivel continuo de aguas subterráneas en los macizos cársicos, semejante a la “capa freática” de los acuíferos en medios porosos, y el concerniente al origen de las cavernas. Ambos han estado tan estrechamente vinculados, que marcaron toda una etapa en el estudio del carso y de la cual, sin dudas, William Morris Davis fue su mayor exponente, aún cuando puedan discreparse de sus conclusiones.

Durante años, la teoría de Davis sobre el origen de las cavernas y por ello, sobre el origen de los circuitos de flujo concentrado en acuíferos agrietados cársicos, predominó en la literatura. Sucesivos reajustes y modificaciones promovidos por el desarrollo de la exploración netamente espeleológica señalaron otros procesos de formación de elementos de conducción; sin embargo, la eclosión de estudios que ella produjo marcó uno de los más importantes capítulos en la historia de la hidrogeología. En la actualidad, bajo un diferente esquema conceptual aplicando, sobre todo, métodos de análisis físico-matemático se ha ido abandonando, poco a poco, la tendencia de la apreciación cualitativa de Davis y sus seguidores que, de hecho, resolvían todo el problema hidráulico en el carso adscribiendo cada caverna (o circuito de drenaje) a uno u otro proceso genético, simplificando, en demasía, la complejidad hidrodinámica de la organización y desarrollo del drenaje subterráneo en los medios agrietados.

Ya a principios de los años cincuenta comenzaba a manifestarse, con mayor nitidez, una diferenciación entre los seguidores de Davis, ocupados en fundamentar los rasgos distintivos de las cuevas “vadosas” y “freáticas” y los autores cuyas investigaciones estaban encaminadas a definir las características del drenaje superficial y subterráneo en el carso.

Probablemente, el motivo de esta ruptura deba buscarse en el diferente enfoque del estudio por ambos grupos de investigadores. Los primeros adoptaron y, muchas veces, extrapolaron arbitrariamente a los sistemas cársicos los conceptos hidrodinámicos comunes a acuíferos en medios porosos homogéneos, y los segundos, establecieron las principales diferencias entre éstos y los sistemas de flujo en medios agrietados, dirigiendo sus esfuerzos a la definición de una zonación hidrodinámica válida para la precisión de las leyes hidráulicas en este tipo de acuíferos.

En cuanto concierne a la flora y la fauna subterránea, dos nombres destacan como fundadores. El rumano Emil G. Racovitza y el francés René Jeannel. En 1920, Racovitza organiza, en Cluj, Rumania, el primer instituto de espeleología, que hoy lleva su nombre. Constantin Motas ha señalado como el gran mérito de Racovitza, poner orden en el caos, de desbrozar el terreno del mate-

rial disponible y de construir la nueva ciencia del mundo viviente subterráneo...: la Bioespeleología.

Hacia 1907, Racovitza publica su *Ensayo sobre los problemas bioespeleológicos*, donde se refiere no solo a los problemas de biología general relacionados con los animales cavernícolas, sino que también profundiza, en las particularidades de la adaptación a la vida subterránea. Racovitza critica con fuerza la teoría lamarckiana evolutiva respecto a sus limitaciones para explicar, por ejemplo, la atrofia ocular o la despigmentación de ciertas especies cavernícolas.

Dos años más tarde, Carl Eigenmann publica, en los Estados Unidos, el interesante trabajo *Vertebrados cavernícolas de América*. Un ensayo de biología degenerativa, en la que autor llama la atención de los zoólogos de principios del siglo XX sobre los vertebrados, ya que la mayoría de las publicaciones anteriores se referían a los invertebrados. Asimismo, Eigenmann dedica una atención especial al análisis crítico de las teorías de la época sobre el origen y la evolución de la fauna subterránea. Los trabajos de Chappuis son especialmente importantes en relación con los microcrustáceos subterráneos. Louis Fage centró su interés en los peces pero, sobre todo, en los arácnidos.

Albert Vandel es uno de los grandes nombres de la Bioespeleología. Fundador del Laboratorio Subterráneo de Les Moulis, en Francia, es el autor del primer tratado completo sobre Bioespeleología, publicado en 1964, que constituye aún hoy, una fuente única de información en ese dominio.

Como señalara Franc Jenko para los sistemas cársicos (1967) *los problemas a resolver son hidrológicos, hidráulicos, geológicos, geomecánicos, morfológicos y espeleológicos, de ahí que para el desarrollo del conocimiento del Carso no se trata solamente de luchar contra él, sino de combatir la incompreensión del Carso y eliminar los prejuicios de que es objeto su estudio...*

CALIZAS

La caliza es el elemento idóneo del fenómeno cársico. Es el medio de circulación del agua cársica y el dominio donde tiene lugar la larga y compleja evolución subterránea. La caliza, además es la más extendida de las rocas solubles. Esto ocurre a tal punto que algunos autores identifican la morfología cársica o kárstica con la morfología calcárea o de la caliza. Esta última es un material fundamentalmente organógeno y por consiguiente vinculado a la evolución biológica de la Tierra.

El dominio calizo no es despreciable a escala mundial, aunque es una roca de formación reciente, en comparación con las rocas silíceas, cuyos orígenes se hayan mucho más atrás en la historia geológica de nuestro planeta. Las calizas más antiguas han sido fechadas en el precámbrico, y se desarrollaron en progresión geométrica hasta hoy.



Fig. 2. Ejemplo de roca caliza finamente estratificada.

Con el nombre de caliza, rocas carbonatadas en realidad, se designa a un conjunto de rocas de composición heterogénea, cuyo componente fundamental es el car-

bonato de calcio (CaCO_3). Las calizas puras tienen más de 95 % de CaCO_3 . El resto está formado por carbonato de magnesio, principalmente y aragonito, para componer el grupo de minerales carbonatados y otros componentes en pequeña proporción como cuarzo, arcilla y feldespato (minerales arcillosos), así como: glauconita, pirita, etc. En la textura de las calizas deben distinguirse dos tipos de elementos: aloquímicos, que forman la fracción característica de la textura y autógenos que constituyen la matriz o cemento. Los aloquímicos se dividen en cuatro categorías:

- Pellets: agregados de calcita microcristalina redondeados, sin estructura interna.
- Intraclastos: redepositos.
- Fósiles: o restos duros de organismos.
- Oolitos: fragmentos redondeados con estructura interna.

Los cementos o elementos autógenos están compuestos por esparita—cristales mayores de 10 micras—y micrita, con cristales menores de 10 micras. La combinación de matriz y fracciones dan lugar a cinco tipos distintos de calizas, según la textura:

- Calizas espáticas. Predominio de aloquímicos y cemento espático.
- Calizas con predominio de aloquímicos y cemento micritico (oolitas, calizas conglomeráticas, etc).
- Micritas. Calizas con predominio elemento autógenos (micrita).
- Calizas arrecifales. Predominio de aloquímicos fósiles.
- Calizas dolomizadas. Predominio de cementos dolomíticos.

Estos tipos de calizas, hoy día, han recibido denominaciones más modernas de acuerdo al tamaño de los granos y tipo de cemento que los une. De esa forma a las calizas alóctonas, donde los componentes originales no están entrelazados orgánicamente durante la deposición, se han nombrado *mudstone* y *wackestone* si tienen un cemento fangoso calcáreo y se diferencian por el porcentaje de los granos de tamaño entre 0,3 y 2 mm. Las calizas se denominan *packstone* y *grainstone* si la matriz es granular y mantienen menos de 10 % de los granos mayores de 2 mm. *Floannistone* y *rudstone* tienen más de 10 % de granos mayores de 2 mm y se diferencian por estar sustentadas por una matriz o por predominio de granos mayores de 2 mm.

Las calizas autóctonas, que son el caso contrario y cuyos granos son fundamentalmente micro y macro organismos dispuestos de diversas formas han sido nombrados *bafflestone*, *bind* o *boundstone* y *framestone*. Las calizas alóctonas son más carsificables y de acuerdo a las características de los cementos y granos presentan mayor o menor frecuencia de determinadas formas superficiales y subterráneas.

Las calizas autóctonas se destruyen con mayor facilidad, por lo cual no son las mejores exponentes cársicas.

Desde el punto de vista estructural, las calizas tienen dos tipos fundamentales de estructura congénita, singenética y sinsedimentaria o tectónica. La *estructura congénita*, por la presencia manifiesta de planos de estratificación, mayor potencia de sedimentos y, en general, soluciones de continuidad de la masa caliza presenta un desarrollo más completo de los procesos cársicos. La *estructura tectónica* con la acción de fallamientos y plegamientos presupone una complejidad superior y una evolución discontinua.

PROCESOS DE CARSIFICACIÓN Y CAVERNAMIENTO

Los procesos de carsificación y cavernamiento (espeleogénesis) son de tres grandes tipos: *singenéticos*, cuando ocurren durante el proceso de deposición de los carbonatos y asociados a ligeras variaciones en la superficie del mar de la cuenca sedimentaria, que permite la acción de procesos subaéreos; *epigenéticos*, cuando tienen lugar en

la zona no saturada (vadosa para los autores clásicos), en el epikarst o en la zona saturada (freática para algunos autores) e *hipogenéticos*, cuando se producen en profundidad sin intercambio con la superficie y, por supuesto, sin estar sometidas a la acción de procesos superficiales o subsuperficiales. La Tabla 1 resume los procesos de control fundamentales.

En sistemas epigenéticos H_2CO_3 - $CaCO_3$ las reacciones químicas que tienen lugar en la solución y en la superficie de la roca consisten en la producción de iones H^+ a partir del CO_2 .

Tabla 1. Procesos de carsificación y espeleogénesis.

Tipo	Zona hidro-dinámica	Tipo de acuífero	Controles hidráulicos	Sistemas físico-químicos	Controles físico-químicos	Procesos dominantes en el control de la tasa de disolución
Singenéticos	No saturada o vadosa	Libre	Intercambio con procesos subaéreos (efecto de mezcla)	H_2CO_3 - $CaCO_3$	Cinéticos	Mezcla de aguas (fundamentalmente efecto salino y de insaturación por mezcla agua dulce/agua salada
Epigenéticos	Epikarst Zona No saturada o vadosa Zona Saturada o Freática	Libre	Intercambio con procesos subaéreos (agua en movimiento y mezcla de aguas). La capacidad de disolución se atenúa en la dirección del flujo	H_2CO_3 - $CaCO_3$	Cinéticos	Efectos combinados de agua en movimiento y mezcla de aguas
				H_2S - H_2SO_4	Balance de masas	Efecto de mezcla
				Sistemas mixtos: H_2CO_3 - $CaCO_3$ y H_2S - H_2SO_4	Controles mixtos: cinético y balance de masas	Efectos combinados de agua en movimiento y mezcla de aguas
Hipogenéticos	Circulación profunda	Confinado, semiconfinado o semi-libre	Sin intercambio con procesos subaéreos. La capacidad de disolución es independiente del flujo	H_2S - H_2SO_4	Balance de masas	Irrupciones de agresividad limitadas en tiempo y espacio: Efecto de mezcla Oxidación del H_2S Enfriamiento de aguas termales ascendentes Metamorfismo Reducción de sulfatos Maduración de hidrocarburos Dedolomitización

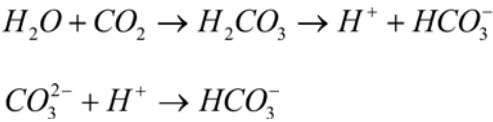
Disolución de las rocas

Un factor determinante en todo proceso de disolución de minerales, es sin duda, el estado de división de la partícula. Es bien conocido que mientras más superficie de exposición presenten los cristales al ataque del agua, más rápido se producirá su disolución, proceso que se detiene al alcanzar el agua su condición de saturación. En la naturaleza, la factibilidad de un macizo carbonatado a la disolución química o carsificación, viene dada por la composición de las calizas; su estado de agrietamiento, porosidad y textura; el estado de yacencia de las secuencias carbonatadas y no carbonatadas, así como otros aspectos relacionados con la tectónica; el tiempo de contacto de las aguas con las rocas, la presencia o no de suelos y sus tipos; el contenido de materia orgánica en el suelo y sus condiciones pedoclimáticas; la actividad del hombre y otros factores.

La textura de las calizas al igual que la de otras rocas, está determinada por el carácter espacial de los cristales o elementos componentes. lo cual se puede deber al resultado de procesos de recristalización, presentándose como una textura de tipo cristalina, granular o microcristalina. La porosidad de la roca se asocia con la textura y depende de la relación entre el volumen de huecos respecto al volumen total de la misma. El proceso de carsificación se hará más o menos factible de acuerdo con la naturaleza, dimensiones, distribución y relaciones mutuas de oquedades.

Las reacciones químicas básicas que tienen lugar en la solución y en la superficie de la roca consisten en la producción de iones H^+ a partir del CO_2 . Estas reacciones son las siguientes:

- agua + dióxido de carbono para formar el ácido carbónico, que se expresa como:



nor a temperaturas más elevadas, a menos que este efecto sea compensado con un contenido mayor de CO_2 en el agua o una presión más elevada en la atmósfera que se encuentra en contacto con el agua. Para alcanzar la máxima disolución de la calcita en las aguas, lo cual corresponde a un contenido de $CaCO_3$ del orden de 350 a 400 *mg/L*, en virtud del sistema CO_2 - H_2O - $CaCO_3$, es necesaria una pCO_2 de 0,02 a 0,1 atm. En las aguas cársicas con mineralización inferior a 0,5 *g/L*, la pCO_2 y la *temperatura* son los dos factores determinantes en la disolución de los carbonatos. En aguas altamente mineralizadas hay que considerar además otros factores, tales como la actividad iónica, la presencia de iones foráneos (cuya influencia es despreciable en las aguas de baja mineralización), el suministro de ácidos orgánicos e inorgánicos ajenos al sistema de los carbonatos, otras fuentes generadoras de CO_2 y ácidos fuertes, así como el efecto de mezcla de aguas. La disolución de los carbonatos está controlada cinéticamente por el contenido de CO_2 . El CO_{2eq} (en equilibrio) se ha asociado al $CaCO_3$ disuelto, mientras que la pCO_2 remanente se relaciona con el CO_2 agresivo, capaz de seguir disolviendo los carbonatos.

Disolución de los carbonatos en presencia de otros iones

La presencia de iones ajenos a los sistemas CO_2 - H_2O - $CaCO_3$ y CO_2 - H_2O - $MgCO_3$, tiende a aumentar la solubilidad de los carbonatos por efecto salino o de fuerza iónica. Se ha demostrado que la solubilidad de la calcita puede elevarse desde 10 hasta 25 % mediante la adición de 0,1 % de NaCl. En laboratorio se han obtenido incrementos en la solubilidad de $CaCO_3$ en presencia de NaCl y MgCl. En este último caso, el incremento fue aún mayor como consecuencia de la formación de los pares iónicos $NaCO_3^+$, $NaHCO_3^0$, $MgCO_3^0$ y $MgHCO_3^+$.

Cinética y velocidad de disolución de los carbonatos

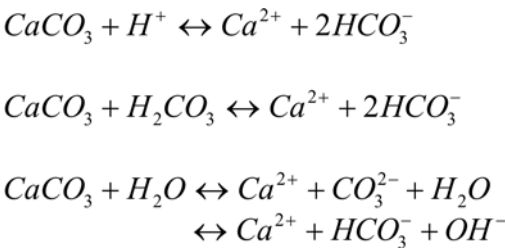
El tiempo de reacción junto a la temperatura y el contenido de CO_2 , son los tres elementos principales que determinan el proceso a través de las distintas fases presentes: gas, líquido y sólido. En las condiciones naturales, en un momento dado, el contenido de CO_2 libre y de CO_2 combinado es el resultado de la acción del tiempo, así como de las condiciones geológicas anteriores.

El proceso de disolución de los carbonatos por un agua que contiene una cierta cantidad de CO_2 ha sido estudiado además, desde el punto de vista cinético, por diferentes autores. Dreybrodt (1992) propuso un modelo de desarrollo de los canales cársicos a partir de las fisuras primarias de las calizas; así como un sistema computarizado para simular el proceso de ensanchamiento de una fractura por un agua agresiva a la calcita.

Corrosión mediante procesos microbiológicos y bioquímicos

Los microorganismos catalizan las reacciones de oxidación-reducción más importantes que tienen lugar en el medio acuático. La producción de dióxido de carbono constituye la principal fuente de suministro por vía bacteriana y requiere de la presencia de oxígeno disuelto en el agua. El CO_2 se combina con el agua para formar H_2CO_3 que es un ácido suficientemente fuerte para disolver los carbonatos. El CH_2O en estas ecuaciones representa un simple carbohidrato, aunque las reacciones también pueden ocurrir con la participación de sacáridos, polisacáridos, ácidos grasos, fenoles, aminoácidos y otros compuestos orgánicos. En el proceso de descomposición de la materia orgánica en el suelo además de CO_2 y los productos que se presentaron en las reacciones se forman, por acción de las bacterias heterótrofas, algunos ácidos débiles como el acético, cítrico, oxálico, etcétera, que aunque resultan

Las siguientes reacciones actúan de manera simultánea sobre el mineral, liberando Ca^{2+} , CO_3^{2-} y HCO_3^{0-} , pero consisten esencialmente, en la disolución y precipitación del carbonato de calcio de la caliza:



Los iones liberados durante la disolución son transportados mediante difusión molecular en la superficie, debe ser mayor que en la solución. Estas reacciones resultan tan importantes, que permiten explicar, prácticamente, todos los procesos de desarrollo del carso y de la formación y evolución de las cavernas.

La disolución de los carbonatos por las aguas naturales es un proceso complejo donde intervienen muchos factores, de ahí que, a pesar de los trabajos teóricos y experimentales desarrollados, los resultados no se corresponden totalmente con los que se obtienen en la naturaleza. El agua destilada en equilibrio con el CO_2 atmosférico ($3,2 \cdot 10^{-4}$ atm) es capaz de disolver 60 *mg* de $CaCO_3$ a 20 °C. Como el contenido de CO_2 disminuye con la temperatura, la cantidad de $CaCO_3$ también será me-

inestables y se conservan poco tiempo en el seno del agua subterránea, no obstante, son capaces de atacar las calizas. Por otro lado, existen bacterias autótrofas que pueden fijar el nitrógeno del suelo, y originan una cadena de reacciones en la cual se forma ácido nítrico, que pasa previamente por amoníaco y nitrito.

Procesos de mezcla de agua por intrusión marina en acuíferos cársicos

En los acuíferos carbonatados litorales, existe un equilibrio dinámico entre el agua dulce que drena al mar a través de los conductos cársicos y el agua marina que penetra por los mismos conductos. En los períodos lluviosos y de menor explotación la presión hidrostática aumenta y se limita la entrada del agua marina. En la zona de mezcla agua dulce-agua de mar se ponen en contacto dos fases químico-físicas muy diferentes en cuanto a su composición química, mineralización, densidad, pH, temperatura y contenido de gases disueltos.

ORIGEN DE LAS CAVERNAS

Resulta uno de los temas más apasionantes y controvertidos. Cuatro aproximaciones han dominado el escenario de las teorías sobre el origen de las cavernas en los últimos 100 años. Estas teorías, mutuamente excluyentes, pueden agruparse del modo siguiente:

Teoría vadosa. Implica que la mayor parte del volumen de la caverna es excavado por corrientes fluviales con una superficie libre. El agua penetra desde un punto en la superficie y desciende hasta el nivel de las aguas subterráneas y se considera que es el proceso más rápido de desarrollo del cavernamiento. Este fue el concepto esgrimido por Martel a finales del siglo XIX y principios del XX.

Teoría freática profunda. Se basa en la suposición de que si el desarrollo de la permeabilidad desde el punto de recarga al de descarga es tal que puede mantenerse un nivel estable de las aguas subterráneas sobre un período de tiempo suficientemente largo, la mayor parte de los conductos cársicos se desarrollarán en la zona freática. Esta fue la teoría defendida por Davis y Bretz, entre 1930 y 1942.

Teoría del nivel de las aguas subterráneas. Establece que el agua se infiltra desde la superficie hasta el nivel de las aguas subterráneas, de manera que la mayor parte del movimiento tiene lugar a lo largo de una zona somera cerca de la superficie freática y, por ello, las cuevas se originan en esta zona. Swinnerton, en 1932 y Rhoades y Sinacori, en 1942, fueron los más altos exponentes de estas ideas.

Teoría genética conjunta. Establecida por Ford y Ewers a finales de la década de 1970, que preconiza que las cuevas freáticas profundas y someras eran miembros terminales y las cuevas vadosas se originan del avenamiento de éstas.

Años después que Grund publicara su clásico estudio, algunos autores como Greene (1909), Beede (1911) y Addington (1927) no consideraron la influencia del nivel de las aguas subterráneas en el control de la carsificación vertical y apenas lo estudiaron. La causa del flujo horizontal y de galerías subterráneas superpuestas, por ejemplo, la explicaban argumentando la presencia de estratos impermeables o a la influencia de niveles de base de erosión de corrientes fluviales epigeas. Por otra parte, autores como Matson (1909), Weller (1927) y Swinnerton (1929), reconocieron el importante papel del nivel de las aguas subterráneas en la dinámica de los sistemas de flujo y, por ello, en la formación de cavernas y, aunque no pensaron en la posibilidad de una circulación más profunda, capaz de producir carsificación, supusieron —no sin razón— que la más intensa disolución ocurría en el límite de las llamadas zonas “vadosa” y “freática”, siguiendo la terminología de Grund y Meinzer (1927).

Sin embargo, autores europeos como Katzer (1909) y Bock (1913) señalaron los rasgos esenciales que, inicialmente, serían los más importantes en la formación de

conductos cársicos. Al respecto, sugirieron que la velocidad del flujo sería un elemento determinante. No obstante, especulando sobre la presencia de una masa integral de agua sometida a presión en los macizos cársicos, indicaron que la zona de excavación se encontraría por debajo de la superficie potenciométrica.

En 1930, William Morris Davis publicó su clásico estudio sobre el origen de las cavernas. A partir de entonces, desde el punto de vista hidrodinámico y, por ende, genético, comenzaron a distinguirse dos tipos esenciales de conductos: aquellos debidos a la acción de las aguas subterráneas en la llamada “zona freática” y las que se originaron como consecuencia de la acción disolvente de las aguas infiltradas en la “zona vadosa”. Tales cuevas fueron llamadas por Davis, respectivamente, cuevas del doble ciclo y cuevas del ciclo único y, por lógica generalización de su teoría, cuevas freáticas y cuevas vadosas. Aunque Davis formalmente reconoció que sus ideas eran similares a las de Grund, a diferencia de éste propuso considerar que la formación de cavernas tenía lugar en la llamada “zona freática”.

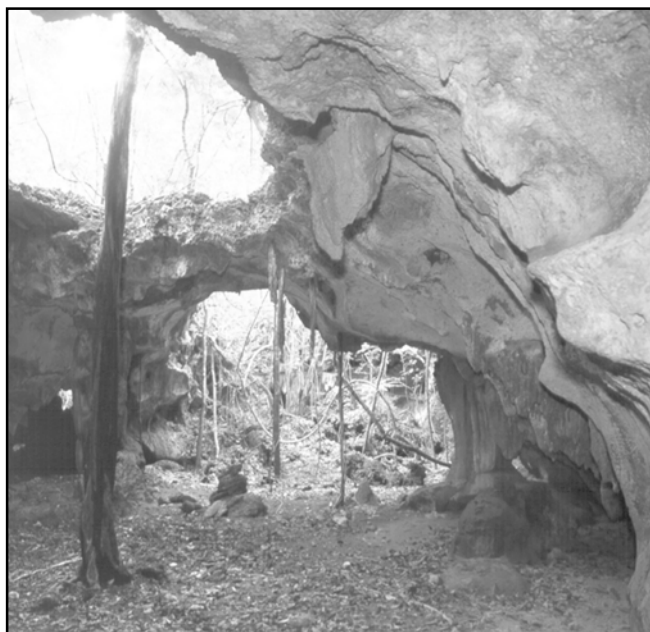


Fig. 3. Interior de una caverna típica desarrollada en la zona freática muy cercana a la superficie dado su cercanía al mar. Cueva de las Perlas, Península de Guanahacabibes.

Piper, en 1932, concluyó que la circulación profunda adquiriría cierta velocidad siempre que las aguas no se saturaran de calcita, de manera que las grandes cavernas por él estudiadas se formaron en el límite entre las zonas freática y vadosa. Esta idea fue ampliada por Swinnerton (1932) quien, sobre la base de los trabajos ya citados de Matson y Weller, estableció que la circulación que ocurre a la altura del nivel de las aguas subterráneas es fundamental en la formación de conductos, apoyado en la tesis de Finch (1904), quien suponía que en los acuíferos constituidos por rocas consolidadas existían dos zonas de saturación: una superior, de agua en movimiento, y otra inferior, estática. Swinnerton consideró que si el agua pudiese fluir directamente bajo el “nivel freático” siguiendo todos los conductos posibles, el más horizontal de todos, por ser el más corto, movería el mayor volumen de agua, de manera que esta zona estaría menos saturada de calcita que aquella que fluye por canales más profundos.

En 1932 también, Oscar Lehmann publicó el primer intento de aplicación de la teoría de la mecánica de los fluidos a la aclaración de la circulación del agua subterránea en el carso. Un análisis de este tipo no volvería a hacerse sino treinta años más tarde.

Gardner (1935) y Malott (1938) estudiaron el papel de la litología y de la evolución geomorfológica en el control

de la carsificación subterránea; sin embargo, no consideraron los mecanismos de flujo hipodérmico y de la teoría de la infiltración, sobre todo, porque sus estudios se centraron en aquellos casos de “espeleogénesis vadosa”.

Hubbert (1940), por su parte, analizó las opiniones de Swinnerton y mostró que, generalmente, el agua subterránea en los medios fisurados se mueve siguiendo patrones curvos y que los conductos alternos para el fluido no eran posibles, de manera que elaboró un esquema diferente del flujo en acuíferos cársicos. En 1941, Rhoades y Sinacori elaboraron un esquema similar al anterior, concluyendo que la disolución será mayor allí donde el flujo está más concentrado. De este modo, según esos autores, la excavación comenzaría en el punto de descarga del acuífero hacia una corriente superficial progresando horizontalmente en sentido contrario a la dirección del flujo. Al año siguiente, 1942, Bretz estudió una serie de formas de erosión en las cavernas que vinculó a las etapas de inundación por “aguas freáticas”, así como a la presencia de corrientes “vadosas” en la segunda etapa davisiana de evolución del circuito de drenaje subterráneo.

RELIEVE CÁRSICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO

Grupos de formas del relieve cársico superficial

Formas de absorción

Como excepción, y en lo que constituye una de sus mayores singularidades, el relieve cársico se compone por formas superficiales y subterráneas, estrechamente asociadas por la vinculación hidrológica que existe o existió entre ellas y por el papel que desempeñan, en el sistema cársico, respecto a su capacidad para coleccionar, transformar o drenar las aguas superficiales y subterráneas. Así, se reconocen los siguientes tipos de formas:

- Formas de absorción (como las dolinas, sumideros o ponores, los valles, los poljes y las uvalas)
- Formas de conducción (como las cuevas y las simas)
- Formas de emisión (como los manantiales)

Lapies, karren o diente de perro

Son formas típicas y elementales del relieve de las regiones cársicas que se presentan aisladas o como extensos campos. Se compone de crestas y canales pequeños de diversos tamaños, largo, ancho y dirección. Los lapies modifican el aspecto original superficial de las ro-



Fig. 4. Ejemplo de lapies de pináculos o puntiagudo. (Nótese las dimensiones de las formas al compararlo con el explorador que se encuentra entre ellos).



Fig. 4a. Kameritza o "carmelita" es un tipo de lapies en que predomina una parte cóncava, rodeada de crestas aficadas.

cas carbonatadas. Dependen más que otras formas cársicas de las diferencias de solubilidad, permeabilidad, fracturas y buzamiento de las rocas y reflejan con mucha claridad las variaciones del grado y dirección de la disolución o carsificación.

Dolinas

Es considerada la estructura más típica del relieve cársico. Son depresiones simples, en forma de embudo, de morfología comúnmente redondeada u ovalada, cuyo diámetro no debe sobrepasar los 500 m. Se originan a través de fallas, grietas y alineaciones del relieve, presentando alineamientos particulares que siguen las direcciones tectónicas locales y regionales, las que afectan la morfología de las dolinas. En general, son causadas por procesos corrosivos y sufosivos, es decir por la infiltración de las aguas superficiales y la circulación direccional de las aguas subterráneas y procesos secundarios de desplome y succión.

Uvalas

Se forman por la unión de una o más dolinas individuales, representan un estadio avanzado en el desarrollo de la línea de evolución de las depresiones cársicas, su desarrollo es en sentido horizontal y pueden ser corrosivas, de desplome, de contacto y de agrietamiento.

Poljes

La palabra polje significa, simplemente llanura cultivada, pero los geomorfólogos la reservan para designar una llanura cársica, con una anchura que varía desde algunos centenares de metros hasta varios kilómetros y una longitud que va desde algunos metros hasta decenas de kilómetros. Los poljes cubanos más notables son los de Vento y Jaruco, en la provincia de La Habana, que albergan dos de los más importantes acuíferos cársicos cubanos. Se reconocen, depresiones sufosivas, corrosivas y de hundimiento y desplome. En dependencia de la manera en que la acción de las aguas superficiales o subterránea incidan sobre el macizo cársico y por las relaciones de estas con la litología, para provocar hundimientos y desplomes en las paredes o vertientes de dichas morfologías cársicas.

Valles cársicos

En general, la red fluvial en el carso se presenta de varios tipos. De acuerdo con su funcionamiento hidrológico, estos pueden ser permanentes, estacionales o episódicos.

Según la litología se denominan: de caudal autóctono, cuando todo su curso ocurre sobre rocas carsificadas, de caudal alóctono, cuando su curso transita por rocas carsificadas y no carsificadas. Los valles se clasifican como: ciegos, inversos, muertos y surgentes, en dependencia de su relación con la red fluvial actual o antigua. Así, los valles ciegos son aquellos cuyo cauce superficial termina en una caverna, los inversos están formados por escalonamiento regresivo debidos a absorción por cavidades

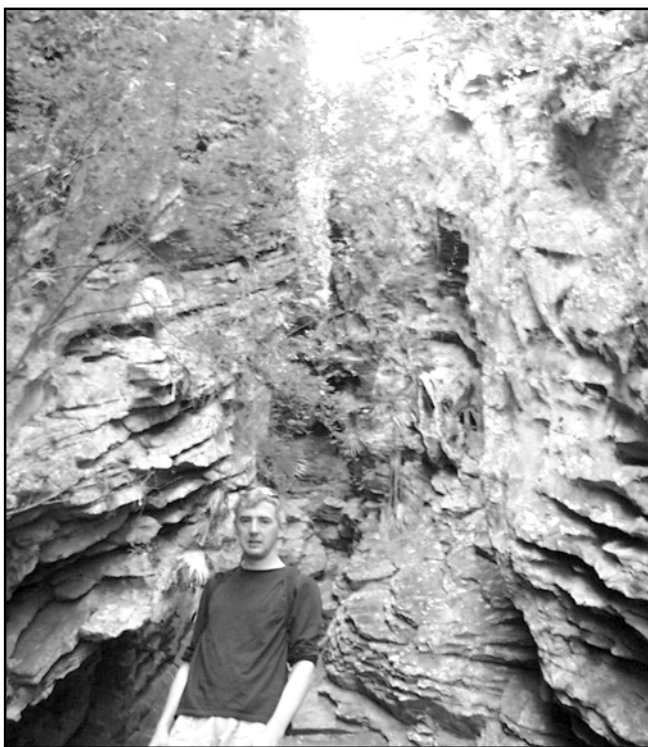


Fig. 5. Ejemplo de cañón fluvio cársico activo que no es más que un tipo de valle cársico muy estrecho formado a partir de una grieta o falla.

inversas, los muertos, por los que ha cesado la circulación superficial y, los surgentes, son aquellos formados a partir de la surgencia, en superficie, de aguas subterráneas.

Formas de conducción y relieve subterráneo

La principal morfología subterránea o hipogea son las cavernas, que aunque su expresión morfológica ocurre en la superficie del relieve, todo su desarrollo espacial sucede por supuesto en el interior del macizo cársico. Son de dos tipos básicos, las esencialmente horizontales, que se denominan, por excelencia, *cuevas* o *cavernas*, y las verticales, conocidas como *simas* o *furnias*.

De acuerdo con la litología y la manera en que ocurre la acción de las aguas sobre la roca carsificable, las cavernas se tipifican como: *directas*, condicionadas por el desarrollo de redes hidrológicas superficiales o subterráneas, *inversas*, debidas a procesos de erosión inversa ocurridos en el interior del macizo y hacia la superficie del relieve, *indirectas*, ocasionadas por procesos erosivos-corrosivos sin la participación de redes de drenaje o de fenómenos de erosión inversa y *mixtas*, resultado de la conjugación de cualquiera de los tipos anteriores. Las cavernas también pueden ser de *caudal autóctono* (formadas solo por aguas cársicas) y de *caudal alóctono* (formadas por aguas, tanto cársicas como no cársicas).

Dado el carácter de su trayectoria y su relación con el acuífero que drena y el relieve, se agrupan en: *transfluentes* cuando atraviesan el macizo y tiene una forma de absorción y de emisión asociadas al relieve, es decir tiene una entrada y una salida de agua hacia el relieve. Cuando solo tienen una entrada, es decir una forma de absorción, se denominan *transcurrentes*.

Otro aspecto según el cual se clasifican las cavernas es el desarrollo espacial y pueden ser: *longitudinal*, *vertical*, *inclinada* y sus *combinaciones*. Dicho desarrollo, esta condicionado por el patrón de la carsificación y su posición espacial. El patrón de la carsificación se define por los espacios cársicos que presentan las rocas carsificadas, tales como porosidad, agrietamiento y estratificación de las rocas que componen el macizo.

Los depósitos en las cavernas se reconocen en la literatura con la denominación de formaciones secundarias, entre ellas se reconocen los tipos siguientes.

Formas de erosión

Bajo la denominación general de formas de erosión se incluyen las evidencias de la acción corrosiva y erosiva del agua; es decir, de su efecto disolvente o de erosión

mecánica sobre los conductos por los cuales se desplaza. Tal acción dinámica puede reconocerse sobre el piso, techo y paredes de los conductos; en la morfología de su sección transversal y, muchas veces, en el perfil longitudinal de la galería. En no pocas ocasiones, también se reconocen formas erosivas sobre espeleotemas o bloques clásticos, que indican una etapa de circulación posterior al crecimiento de las espeleotemas o a la clastificación. En cualquier caso, exceptuando algunas formas debidas a la erosión del viento en climas áridos, lo más común es que sean consecuencia del modo en que se organiza la circulación del agua y, por ello, se reconocen dos grandes grupos de formas: las debidas a flujo difuso y las ocasionadas por el flujo concentrado.

Debido al desarrollo de los procesos reconstructivos, de clastificación y deposición terrígena, las evidencias erosivas suelen conservarse mucho más en las paredes que en cualquier otro sector de la cavidad.

La velocidad a la que se mueve el agua en el conducto es de importancia fundamental para la generación de cualquier tipo de forma de erosión. Tal velocidad es una función del gradiente hidráulico; es decir, de la pendiente de la superficie libre del agua; del mayor o menor número de vías que la roca presenta para la circulación, y de la relación física entre los elementos que conforman la red subterránea de colectores-conductores, así como de la viscosidad cinemática del agua que es, a su vez, función de la temperatura.

El término *flujo difuso* se emplea para designar un medio acuífero caracterizado por los elementos siguientes:

- Las rocas predominantes son calizas o dolomitas nodulosas, de elevada porosidad primaria, definida por una gruesa granulometría o por la presencia de agregados orgánicos, como es el caso de las rocas orgánicas, detriticas y las biohermas.
- Las aguas saturan completamente el medio acuífero, y se mueven muy lento en virtud de un bajo gradiente hidráulico, que por lo general provoca un régimen próximo al lineal y circulación bastante semejante a la de los medios porosos.
- El régimen de las aguas subterráneas; es decir, la variación de la carga hidráulica, composición física y química —en términos de los constituyentes principales, pCO_2 y relaciones de saturación, presentan un bajo coeficiente de variación, lo que indica una negentropía elevada.
- Numerosas cavernas, pero pequeñas, de morfología dendrítica y casi siempre de patrón porosidad.

En ellas se encuentran las siguientes formas de erosión, que fueron descritas por Bretz en 1942 y que, en general, no tienen equivalentes en español:

Parietales

- Huecos interconectados entre estratos (*Bedding-plane anastomoses*).
- Huecos interconectados entre grietas (*Joint-plane anastomoses*).
- Esponjas (*Spongework*).
- Cajas (*Boxwork*).
- Redes (*Network*).
- Bolsadas (*Pockets*).
- Canales horizontales en estratos verticales (*Horizontal chambers in vertical beds*).
- Grietas determinando cavidades (*Joint determining cavities*).

Cenitales

- Todos los anteriores y, además; tubos y medios-tubos (Tubes and half tubes).

Pavimentarias

- Generalmente no se conservan, como consecuencia del propio proceso de disolución, o se encuentran enmascaradas o cubiertas por otros depósitos.

Las formas debidas a *flujo concentrado* se presentan bajo las condiciones generales que siguen:

- Las rocas que constituyen el medio acuífero presentan, sobre todo, una porosidad intersticial baja, resultando rocas muy coherentes, por lo común de grano muy fino.
- Las aguas no saturan completamente el medio acuífero. La circulación es controlada por el plano de estratificación o, mejor, por el patrón de agrietamiento. La velocidad de las aguas es muy variable pero siempre alta, en régimen no lineal, bajo gradientes hidráulicos no muy altos.
- El régimen de las aguas subterráneas lo caracteriza una fuerte variabilidad temporal y espacial, respuestas rápidas, poco amortiguadas, lo que indica baja negentropía y elevada influencia de la componente de fluctuaciones en su balance termo hidrodinámico.
- Las cavernas, numerosas, se caracterizan, sobre todo por largos recorridos subterráneos y elevados valores de sinuosidad y laberinticidad e, incluso, niveles superpuestos de galerías.

Las formas de erosión no presentan la variedad de las formas de flujo difuso pero, son muy importantes en tanto permiten obtener una evidencia muy clara del régimen de flujo y de la evolución hidrológica del conducto y del sistema de flujo en su conjunto. Son ellas:

- Parietales

Cenitales

Pavimentarias
- Scallops y fluttes.
 - Todos los anteriores y, además, marmitas invertidas.
 - Scallops y fluttes, marmitas, y depresiones basales.



Fig. 6. Colada estalactítica activa desarrollada en la pared de una caverna a partir de la unión de varias formas y generaciones de espeleotemas. Es una forma de caudal.

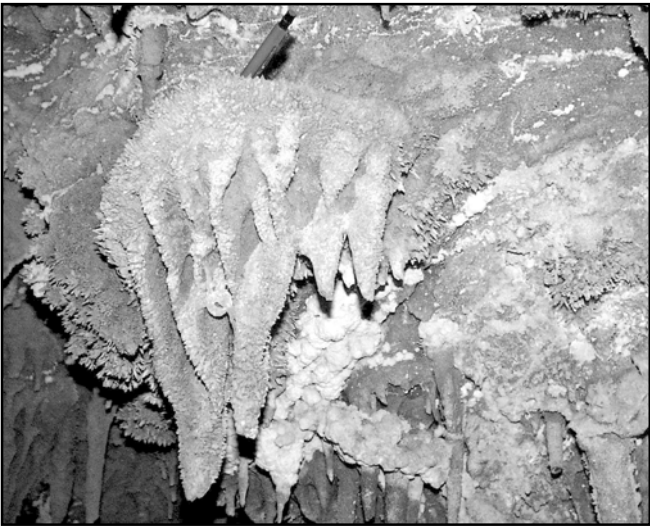


Fig. 6a. Ejemplar típico de estalactitas de diferentes tipos formadas a partir de una "paleta" estalactítica (parte superior plana).



Fig. 7. Cristales de calcita en forma de elictitas (conocidas como "jarritos"). Cueva Jarritos, Matanzas.

Por mucho tiempo, los scallops fueron considerados formas de cavitación, debidos exclusivamente a erosión mecánica. Sin embargo, se deben a procesos conjugados de erosión mecánica y disolución.

La forma de las galerías y, en particular, su sección transversal, es un indicador de los procesos de erosión. Se reconocen las llamadas galerías a presión o en conducción forzada, gravitacionales, clásticas, abrasivas, corrosivas, fusos, seudogalerías y aquellas mixtas. Formas de sedimentación (espeleotemas, depósitos clásticos, aluviones).

Las llamadas formas de sedimentación o de relleno pueden ser autóctonas o alóctonas según se formen en el interior de la cavidad o provengan del exterior.

Las formas autóctonas son de tipo litoquímico, clástico, terrígeno y organógena. Las alóctonas son marinas, organógenas, coluviales y aluviales.

Espeleotemas

Las formas litoquímicas son las espeleotemas o formaciones secundarias y comprenden la llamada "morfología de reconstrucción" de algunos autores. Con tales términos se designa el conjunto de cristalizaciones y depósitos originados por precipitación de las sales carbonatadas en solución en el piso, techo y paredes de las cuevas. Siempre representan un cambio en el funcionamiento hidrológico de la cavidad, donde el agua es sustituida, al menos parcialmente, por aire. Diferentes tipos de espeleotemas son, asimismo, indicadores de distintos estadios y regímenes de circulación de las aguas y el aire a través de las rocas que circundan la galería. Por esa razón, se reconocen dos grupos de factores en el control de su formación. Los factores de caudal (CA) y los factores climáticos (CL).

Los factores de caudal determinan que la cantidad de carbonato de calcio que se depositará será mayor cuanto más caudal de goteo llegue a la bóveda de la cueva en condiciones de depositarse; en tanto los factores climáticos controlan la dificultad de cesión de CO₂ a la atmósfera, ya que cuanto menor sea esa dificultad mayor será el depósito de carbonatos, dependiendo de cuánto mayor sea la pCO₂ en la atmósfera en el momento de producirse la litogénesis. Las formas litoquímicas pueden presentarse en diferentes estadios evolutivos o

mostrar la acción de procesos secundarios como la decalcificación o la redisolución o, incluso, reactivarse hidrológicamente.



Fig. 8. Formación secundaria parietal que se conoce como cortina.

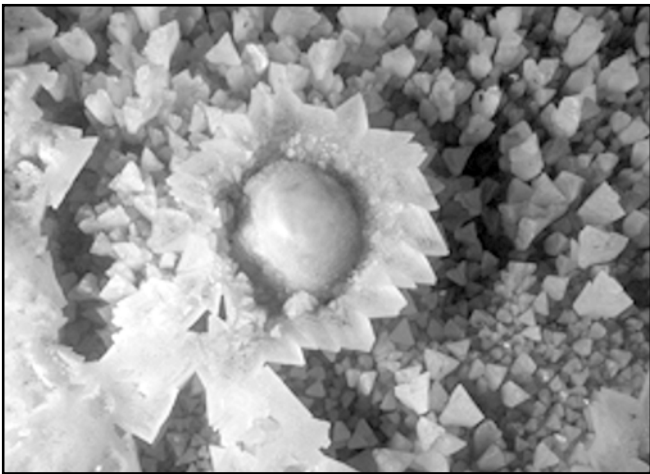


Fig. 9. Cristales de calcita en forma de flor (espeleotema pavimentario).

Cuadro 1. Clasificación de los espeleotemas según el sitio de la caverna en que se desarrollan.

Parietales	Cuando se desarrollan sobre o a partir de las paredes de la cavidad, como las coladas estalagmíticas, gours, mantos y algunos tipos de columnas y estalactitas excéntricas o helictitas.
Pavimentarias	Cuando el crecimiento se efectúa desde el piso, como las estalagmitas y algunos tipos de costras y gours y los pisolitos o perlas de las cavernas.
Cenitales	Cuando crecen desde la bóveda y, en lo fundamental, son estalactitas.

Clastos

Los sedimentos clásticos son depósitos muy comunes en las cuevas. Se designan así los conjuntos o acumulaciones regulares o caóticas de detritos de roca estructural desprendidos del techo y paredes de la cavidad por procesos gravitacionales o fatiga, decalcificación de la roca, disolución o sus combinaciones. Así, por su origen pueden ser de tipo quimioclástico, mecanoclástico, glyptoclástico y graviclástico.

Cuadro 2. Clasificación de los clastos en las cavernas.

Caos de bloques	Acumulaciones de bloques paralelepípedicos de tamaño diverso, con o sin matriz arcillosa, que, a veces, presentan matriz arenosa.
Conos de deyección	Acumulaciones de bloques seleccionados gravitacionalmente, de modo que los mayores están en la parte más baja y los pequeños en lo alto, y el depósito se apoya sobre una pared o pendiente y adopta la forma de un cono de deyección torrencial típico. La matriz puede ser arcillosa o arenosa.
Conos centrales	Depósitos perfectamente cónicos situados bajo chimeneas de hundimiento y suelen tener matriz arcillosa producto de la decalcificación. Cuando son imperfectos se les llama hemiconos.
Coladas de bloques	Depósitos originados por emigración, por solifluxión, de algunas de las formas anteriores. Especialmente se originan a expensas de caos sedimentados sobre una pendiente donde la velocidad de deslizamiento es mayor cuando la matriz arcillosa es abundante.



Fig. 10. Estalagtitas que estuvieron sumergidas y que deben su forma de grandes hongos a la erosión del agua de mar.

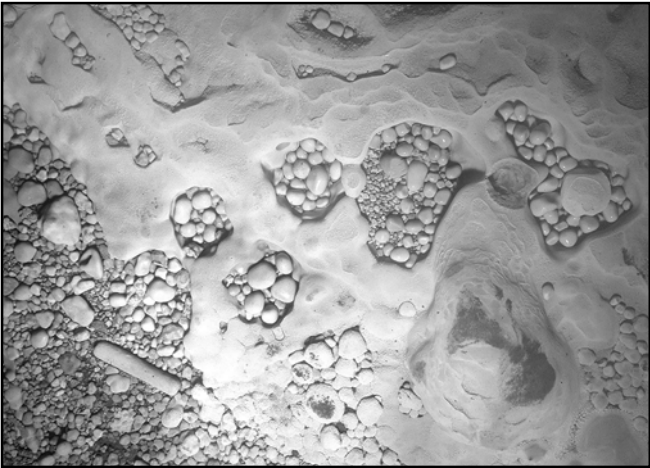


Fig. 11. Perlas de cueva. Espeleotemas o formaciones secundarias pavimentarias.

Sedimentos terrígenos y organógenos

Los sedimentos terrígenos son:
Aluviales, producidos como consecuencia de la erosión, transporte y deposición de detritos por caudales organizados en la propia cavidad.
Eluviales, como resultado de los procesos de decalcificación y *lacustres*, originados por la deposición en estanques.
Los sedimentos organógenos subterráneos son, usualmente, detritos de especies que habitaron temporal o permanentemente la cavidad. Por su frecuencia, destaca el guano de murciélago, pero puede tratarse también de enterramientos humanos o restos de comida.
Entre los sedimentos alóctonos, se encuentran los *marinos*, comunes en cavidades litorales y de costas emergidas y compuestos básicamente por arcillas marinas, arenas y conglomerados. Los *organógenos*, a veces constituyen significativas acumulaciones de brechas y coladas con abundante fauna y flora extinguida. Los *colu-viales* se producen por aportes superficiales de pendientes. Los *aluviones*, re-

sultan notables depósitos subterráneos y forman, muchas veces, importantes series de terrazas fluviales subterráneas.

Formas de emisión

Los manantiales o formas de emisión resultan el último elemento de la cadena absorción-conducción-descarga sin la cual el sistema cársico no puede funcionar, se transforma en un sistema inerte y pierde todo significado hidrológico. Los manantiales, fuentes y surgencias, representan siempre un punto donde descarga un sistema de flujo y tienen por ello, la mayor importancia hidrológica y espeleológica. Por eso, se distinguen los *autóctonos*, generados dentro del macizo cársico, de los *alóctonos*, cuyo caudal proviene o se origina fuera de los límites del macizo cársico y aún de los *híbridos* o *mixtos*.



Fig. 12. Formas de emisión del carso: manantial cársico que brota entre bloques de caliza, en el interior de un cañón fluvio cársico.

Es común distinguir, en los manantiales, la relación de la descarga con los cauces superficiales, el tipo de recorrido subterráneo que siguen las aguas antes de emerger y, sobre todo, si la descarga es permanente, estacional, episódica o fósil.

EVOLUCIÓN DEL CARSO Y LAS CUEVAS

Durante muchos años se discutió, y aún se hace, cuál era el esquema evolutivo del carso. Pese a diferentes puntos de vista, existe un acuerdo unánime en que la evolución, lineal o no, está controlada por la circulación del agua en el macizo. Los puntos de vista extremos son los que consideran la evolución cíclica o lineal. La evolución cíclica se basa en los postulados de los ciclos de erosión y estuvo muy en boga entre 1894 y 1950, sin que se haya abandonado totalmente. Desde principios de los años 70 del siglo pasado, con la incorporación de los principios termodinámicos al carso, y la introducción del concepto de entropía en el control de la dirección de los procesos, otro punto de vista muy fuerte ha cobrado importancia. De cualquier modo, pueden reconocerse cuatro tipos de etapas evolutivas en el carso y las cuevas, a saber:

- **Paleocarsos**, son todos aquellos aparatos, sistemas o regiones carsificadas en épocas geológicas anteriores, desactivados hidrológicamente y, aún cubiertos por rocas más jóvenes.



Fig. 13. Carsos activos, como muestra la foto, esta caverna se encuentra totalmente activa, lo que hace necesario medios especiales para su explotación.

- **Carsos fósiles**, se dividen en dos grandes grupos, los *holofósiles*, o de *fosilización total*, o los *merofósiles*, o con *fosilización parcial*. Se definen como aquellos carso y cavernas rellenos por sedimentos en los que la circulación cársica ya no existe.
- **Carsos muertos**, son aquellos en los que la circulación cársica ha dejado de existir, aunque las formas no se encuentran rellenas por cantidades importantes de sedimentos que impiden la circulación de las aguas. De hecho, muchos carsos muertos son, en rigor, carsos merofósiles.
- **Carsos activos**, en ellos las aguas se mueven desde los puntos de recarga o absorción hasta los de descarga. Son aquellos sistemas de flujo en los que el agua se mueve sujeta a las leyes hidrodinámicas del carso y se corresponden con dos grandes grupos, los *holocarsos* y los *merocarsos*. En los *holocarsos*, o carsos típicos desde la super-

ficie al límite inferior de las rocas carsificables se reconocen cuatro zonas hidrodinámicas:

- **Zona superior, de aereación o vadosa**, que se extiende desde la superficie del terreno hasta la superficie superior de la superficie piezométrica o de las aguas subterráneas, y en la que se encuentra el *epikarst*.
- **Zona de fluctuación estacional** de las aguas subterráneas, donde tienen lugar los cambios estacionales de la superficie piezométrica.
- **Zona saturada o freática**, que se extiende desde el límite inferior de la zona de fluctuación estacional hasta una zona, no muy clara, de circulación profunda.
- **Zona de circulación profunda**, donde las aguas se caracterizan por tiempos elevados de residencia, una concentración cercana a la saturación y unas velocidades lentas de circulación, bajo un fuerte control de la energía potencial del sistema.
- Los **merocarsos** son aquellos en los que falta cualesquiera de las tres últimas zonas.

COMPONENTES DEL MEDIO AMBIENTE SUBTERRÁNEO

El ecosistema subterráneo se caracteriza por la ausencia de luz en su mayor parte, el silencio casi completo y las particulares propiedades del aire cavernario. Presenta dos niveles interactuantes: el físico y el biológico. En el *nivel físico* se encuentran el microclima, los flujos de masa,

el sustrato. En el *nivel biológico* se halla la peculiar flora y fauna subterráneas.

El *microclima* se caracteriza por presentar tres zonas: de penumbra, en esta los componentes físicos y biológicos se vinculan al medio exterior y se presentan variaciones apreciables de luz, temperatura, humedad y materia orgánica; la zona intermedia (o de temperatura variable), que es un área de oscuridad completa donde la temperatura y la humedad oscilan con la media exterior y la zona profunda, con temperatura y humedad constantes y casi estables.

En los *flujos de masa* se consideran: el agua, que es el transportador de materiales y nutrientes hacia y desde la cueva; y el aire, que provoca cambios de temperatura, humedad, y de las concentraciones de CO₂ y O₂ en la cueva. Lo integran, también, la transferencia de materiales desarrollada por animales que viven en la cueva pero obtienen su comida en superficie, la radiación, principal suministrador de energía y las rocas y sedimentos que provocan alteraciones en el flujo de masa interno.

El *nivel biológico* de las cuevas es sorprendente. Si bien la abundancia de vida no es una de sus características más importantes, la fauna y la flora que viven en ellas, con diferentes niveles de adaptación, constituyen una extraordinaria manifestación de la diversidad biológica.

La fauna se clasifica en tres grandes grupos: los *Troglobios*, especies obligadas de las cuevas, que no podrían sobrevivir en otros hábitat; los *Troglofilos*, especies facultativas que viven y se reproducen en cuevas, pero pueden hacerlo en micro hábitat frescos, oscuros, protegidos y húmedos en superficie y los *Trogloxenos*, que usan las cuevas como refugio por su microclima favorable. También hay especies que llegan accidentalmente a las cuevas y no adaptadas a la vida en el subsuelo.

Excepto algunas briofitas (musgos), la flora no puede adaptarse a las condiciones de oscuridad y humedad de las cuevas. Por último, se encuentran las *bacterias*. En este caso, debido a la falta de producción de energía dentro de la cueva los organismos, en su mayoría son heterótrofos, es decir, que se alimentan de cualquier planta o animal aunque se exceptúan algunas bacterias que sintetizan químicamente el hierro (ferrobacterias) o el nitrógeno (nitrobacterias).

Nivel físico

El clima de las cavernas

El clima de las cavernas se caracteriza, en general, por los elementos siguientes:

- La oscuridad total, que reduce los efectos directos e indirectos de la radiación solar, como la evaporación y el calentamiento diurno.
- Pequeñas variaciones diarias, estacionales e hiper- anuales de la temperatura del aire.
- Bajo nivel de perturbaciones del aire interior, como la presencia de vientos o corrientes de aire.
- Elevada humedad del aire interior, debida a las bajas perturbaciones que sufre el aire interior.

Sin embargo, se presentan notables excepciones de estas regularidades y, así, se reconocen fuertes oscilaciones de temperatura y humedad en muchas cuevas, tanto de climas templados como tropicales. Del mismo modo, la ocupación parcial o total de la caverna, su uso ocasional, la iluminación artificial, la apertura o sellaje de entradas o claraboyas, desvío de ríos, sustitución de la fauna subterránea o desecación de lagos son factores que impactan muy fuerte sobre el clima de las cavernas. Es precisamente el clima subterráneo el que condiciona la estabilidad de las reacciones químicas y los procesos físicos que tienen lugar en su interior, controla el crecimiento y desarrollo de las espeleotemas y soporta la diversidad biológica subterránea. De todos estos elementos, la temperatura del aire es, quizás, el más importante.

La *temperatura del aire subterráneo* está controlada por la temperatura del aire exterior, de las rocas y del

agua, así como por la latitud y altura a la que se encuentra la cueva, la morfología y disposición de las galerías subterráneas, el número de entradas y su altitud y, en algunos casos, por el tipo y distribución de ciertos especímenes de la fauna subterránea y los productos asociados a los ciclos biogeoquímicos subterráneos.

El aspecto más notable del mundo subterráneo es la oscuridad. Aún cuando las cuevas y túneles pueden estar iluminados, salvo los que se usan para el transporte vial, no están iluminados de modo permanente. Estas condiciones de oscuridad y de ausencia de focos interiores de emisión de calor o frío disminuyen, notablemente, el efecto de evaporación en el subsuelo. La mitigación de la radiación solar contribuye de manera decisiva a ello. Por lo común, el movimiento del aire dentro de una caverna es tan lento que a unos pocos cientos de metros de la entrada de una caverna el aire adquiere, aproximadamente, la misma temperatura de la roca de las paredes, de modo que, en las partes más profundas de las cavernas, la temperatura del aire suele estar controlada por la de las rocas que, en suma, es casi igual a la temperatura media anual del aire exterior.

La *fluctuación diaria y estacional* de la temperatura en la superficie de la Tierra tiende a disminuir según el calor se mueve hacia el interior de la cueva y a través de las rocas. Una fluctuación diaria de 30°C de temperatura se reduce a una fluctuación no mayor de 1°C a 57 cm de profundidad. De igual modo, una oscilación anual de alrededor de 1°C a la profundidad de 11 m. Esto es lo que se conoce como gradiente geotérmico. Como quiera que las cuevas suelen encontrarse a más de 11 m de profundidad, presentan variaciones de temperatura menores de 1°C. Las *condiciones térmicas* de la roca son una función de la conductividad térmica, de la densidad de la roca, su capacidad calorífica y, por supuesto, de la temperatura del aire exterior y equivale, aproximadamente a 1/535 veces la variación externa.

Tabla 2. Alcance en profundidad de la temperatura en función de los períodos hipertermales.

Período	Denominación	Alcance en profundidad (penetración de la longitud de onda)
24 horas	Ciclo diario	1,25 m
28 horas	Ciclo lunar	6,6 m
1 año	Ciclo anual	24, 0 m
11 años	Ciclo solar	79,5 m
20 000 años	Precesión de los equinoccios	3 400 m
1 000 000 años	Ciclo hipotético	24 000 m

Esto resulta muy importante para el estudio de los cambios climáticos ya que, probablemente, el evento climático más antiguo registrado en una cueva, sea el último estadio climático de la edad de hielo del pleistoceno. Como han señalado otros autores, asumiendo que el ciclo a la cual pertenece comenzó hace 40 000 años, y que la temperatura mínima promedio fue de unos 10 °C menos que la actual, la fórmula anterior indica que el efecto de esta última glaciación igualaría 1°C a la profundidad de 1 464 m. La cueva más profunda es la Sima Voronja, en Abjasia, en el Cáucaso, tiene un desnivel total de -1710 m.

La existencia de diferentes entradas en una misma red subterránea es un agente importante del clima subterráneo en cuanto concierne a sus efectos sobre la distribución de la temperatura, la humedad relativa y la circulación del aire.

El **tipo térmico normal** se corresponde, sobre todo, con simas verticales, del tipo de pozos angostos o compuestos por varias chimeneas que unen, entre sí, varios pasos oblicuos. En este tipo de cavidades, por debajo de la zona superficial de elevada variabilidad y después de la zona invariable, se registra un ascenso de la temperatura mayor que el que debía esperarse solo de la diferencia de altitud en una atmósfera saturada de vapor de agua o muy cerca de la saturación. En el Abismo de Kluc, donde la temperatura media exterior es de 18,5 °C, se observa un aumento de 1,2 °C por cada 180 m de profundidad.

El **tipo térmico inverso** corresponde al descenso de la temperatura por debajo de la zona invariable y es común

en cuevas de entrada amplia. Suele darse aquí el fenómeno denominado de inversión de temperatura donde el aire frío, más denso que el aire caliente, se acumula en el interior, mientras que los accesos se calientan. Esta es la razón por la cual algunas cavidades descendentes son frías, cuya temperatura se muestra inferior a la media del lugar. La Cueva del Frigorífico, en el Escambray cubano es un caso típico. Un ejemplo muy bien estudiado, el del Abismo Enrico Revel, en La Spezia, Italia, presenta un descenso sistemático de temperatura con la profundidad.

La humedad relativa, por lo general es muy alta, próxima a 100 %, lo que significa que el aire de la mayor parte de las cuevas está saturado de vapor de agua. Ello es debido tanto a que los techos paredes y pisos se encuentran humedecidos con aguas de rezumamiento en contacto con el aire circulante. La constancia de la temperatura en las partes internas de la cueva permite que la alta humedad se mantenga casi indefinida. No obstante, cerca de las entradas, la humedad relativa puede ser más baja debido, a que la humedad exterior es usualmente menor y, en parte, también, a que la temperatura de la cueva difiere de la temperatura exterior del aire.

Los efectos de la circulación del aire son especialmente notables en el control del clima subterráneo y pueden modificar, por completo, los efectos y regularidades antes descritos. Estos fenómenos son más importantes en cuevas con varias entradas a diferentes alturas, pero los circuitos de convección también se producen en cuevas con una sola entrada y, en determinadas condiciones se pueden producir los llamados *cmidores*, o corrientes de aire falsas, sobre todo asociados, en Cuba, a los flujos de aire en cuevas que constituyen trampas térmicas de calor.

Tipos de cuevas de acuerdo con la circulación del aire

Se conoce como *circulación en saco de aire* la que se produce en cuevas con una sola entrada, o cuevas estáticas, y *circulación en tubo de viento* la que ocurre en cuevas con diferentes entradas, también llamadas cuevas dinámicas. En ambos casos, la circulación puede ser ascendente o descendente, múltiple o sencilla. El esquema de funcionamiento se describe a continuación.

En el *tubo de viento*, las entradas superiores siempre son más cálidas que las inferiores, ya que el aire caliente es más ligero y tiende a ascender. Pero como el aire interior suele ser más caliente que el exterior en toda la cavidad durante el invierno, se producirá una entrada del aire exterior por la entrada inferior, un calentamiento interno y una expulsión, a veces intensa por las entradas de la cumbre, llamadas “huecos” o “pozos sopladores”.

Un fenómeno adscrito en ocasiones al efecto de chimenea o a la circulación más general, de tubo de viento, es el de las *cuevas que respiran*. No es un fenómeno muy estudiado, que se produce cuando el aire se mueve hacia el interior por unos pocos minutos y hacia el exterior por otros tantos, como si la cueva, en realidad, estuviese respirando. El fenómeno es semejante al llamado “Resonador Compuesto de Helmholtz”. El agente que lo produce es, probablemente, la turbulencia del viento que sopla cuando pasa la entrada. La velocidad es menos importante, ya que el resonador responde a pequeñas perturbaciones en la corriente de aire que están en fase con la frecuencia de resonancia.

Los *cambios de presión* pueden producir, también, corrientes de aire. La mayor parte de las entradas a los conductos subterráneos están ventilados debido al intercambio de aire con el exterior. Tal intercambio varía en función de la presión cambiante en la atmósfera exterior. Estos cambios son de dos tipos *periódicos* y *no periódicos*. El más importante es el *cambio periódico* que ocurre con un período de 24 horas resultante de la diferencia de temperatura del aire entre el día y la noche. Durante el día, el aire es más caliente, se hace menos denso y la presión disminuye. En la noche ocurre lo contrario. Normalmente, el aire comienza a fluir hacia la cavidad al atardecer y desde ella, al amanecer. Variaciones no periódicas están asociadas con el paso de un frente de tormenta o un huracán. Tales

efectos se superponen a la fluctuación diaria y la cueva se ajusta al efecto resultante de ambos cambios.

Un fenómeno interesante es el de las *trampas térmicas*. Se trata de cuevas o sectores de ellas donde las regularidades antes descritas no se cumplen y están asociadas, por ello, a focos internos de emisión de calor o de frío. Las trampas térmicas pueden ser permanentes, episódicas o estacionales. Las trampas de calor son comunes en climas tropicales mientras que las frías lo son de climas templados. Las primeras suelen asociarse a la conjugación de factores morfológicos y biológicos y, en particular con la producción local de calor derivada de reacciones exotérmicas biogeoquímicas, entre las que destacan la descomposición del guano del murciélago *Phylonycteris poeyi*, de hábitos especialmente gregarios. En Cuba hay ejemplos de las llamadas "cuevas de calor". Las trampas frías más espectaculares son las llamadas cuevas de hielo, y están asociadas a cuevas situadas a gran altitud que presentan una temperatura inferior a la congelación cuando la temperatura media anual es inferior a 0°C y, por ende, contienen hielo durante todo el año. La Cueva de Los Gigantes de Hielo, en los Alpes austriacos es uno de los más notables ejemplos de este tipo. Ledenika o Cueva Fría, en Bulgaria, es de las más famosas del mundo.

Nivel biótico

Uno de los aspectos más atractivos de los ecosistemas subterráneos es la biota (bacterias, flora y fauna) que habita en la compleja red de galerías, grietas, fisuras y pasajes del subsuelo, algunos de ellos inundados de agua de manera permanente o temporal. La diversidad biológica y la biomasa son relativamente bajas. En estos ecosistemas, sobre todo en las partes más profundas, están representados algunos ejemplares de pocas especies, aunque con atributos que los hacen únicos.

Los animales que habitan las cuevas exhiben diferentes estados de adaptación a este ambiente, debido, ante todo, a las singulares condiciones de iluminación, silencio, humedad relativa, presión y temperatura, que convierten al sistema subterráneo en un entorno terrestre excepcional. De acuerdo con el nivel de adaptación se han propuesto diversos sistemas que pretenden clasificar a los organismos cavernícolas en diferentes categorías ecológicas. El que se ofrece a continuación es el más extendido y fue propuesto por Schiner (1854) y completado por Racovitza (1907).

Troglobios. Son los verdaderos animales de las cavernas, que no podrían sobrevivir en un ambiente diferente.

Por lo general, exhiben adaptaciones morfológicas evidentes (despigmentación, anoftalmia o reducción ocular, alargamiento de los apéndices). Ejemplos: peces, camarones ciegos, grillos de cueva, etcétera.



Fig. 14. Ejemplar de pez ciego (*Lucifuga dentatus*). Especie endémica de nuestro país, constituye el más grande de nuestros troglobios.

Troglófilos. Especies facultativas que normalmente viven y se reproducen en cuevas, pero que también pueden ser encontradas en hábitats frescos, húmedos, oscuros y protegidos del ambiente epígeo. Suelen separarse en dos grupos, los subtroglófilos, que presentan adaptación al ambiente subterráneo y usan la caverna sólo como refugio temporal, y los eutroglófilos, que están bien adaptados a la vida bajo tierra, pero que en condiciones favorables pueden volver al ambiente epígeo. Estos animales son la fuente de origen de todos los troglobios.

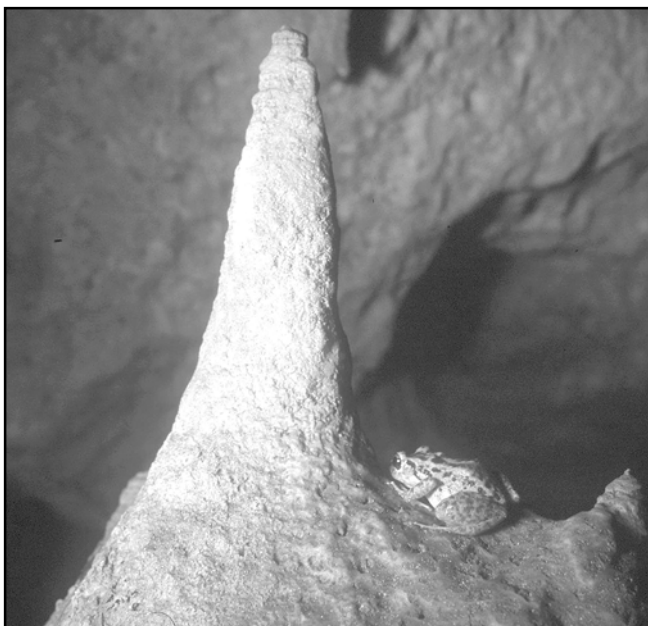


Fig. 15. Rana del género *Eleutherodactylus*. En algunas de las especies de este género el ciclo reproductivo ocurre en el ambiente húmedo de las cuevas.

Troglóxenos. Especies que utilizan las cuevas como refugio, pero que no completan su ciclo de vida en ellas. Regresan periódicamente a la superficie en busca de comida o para reproducirse. Muchas de ellas son especies de hábitos nocturnos. Los murciélagos son el caso más común, aunque se pueden mencionar a las ratas, majáes, lechuzas, avispa, entre otros.



Fig. 16. Detalle de la cabeza de un ejemplar de *Phyllonycteris poeyi*, especie de murciélago endémica cubana y una de las más abundantes en cavernas de nuestro archipiélago.

En el caso de la fauna acuática, los términos de troglobio, troglófilo y troglógeno son sustituidos por estigobio, estigófilo y estiglógeno. Sin embargo, a diferencia de la fauna terrestre, en la acuática son muy raros los estiglógenos.

Los animales más comunes en las cuevas son los troglófilos, que llegan a representar más de la mitad de la comunidad cavernícola. Los menos comunes son los troglobios, verdaderos cavernícolas que, en algunas cuevas de países templados llegan a constituir hasta 20 % de la población total pero, en el trópico pueden ser tan bajos como 5 % o resultar inexistentes. Una de las explicaciones dadas a este fenómeno ha sido el de la mayor abundancia de recursos tróficos en las cuevas tropicales, lo cual haría que la selección natural favorezca el desarrollo de un número importante de nichos mutuamente exclusivos, mientras que en las cuevas templadas la menor abundancia de alimento obligaría a los animales a explotar las pocas fuentes disponibles y a sobrevivir adaptándose a condiciones más extremas.

Entre las adaptaciones que presentan las especies animales troglobias, proceso que recibe el nombre de *troglobización*, es posible mencionar las siguientes: Depigmentación del tegumento, atrofia ocular; adelga-

zamiento de los apéndices, con hipertrofia de otros órganos no ópticos; y una tasa metabólica muy baja. Adicionalmente, se observan otras adaptaciones, como: gigantismo, puesta de un menor número de huevos, pero estos de mayor tamaño que el de especies afines; cuerpo estilizado, con los apéndices muy alargados; entre los insectos, puede ocurrir apterismo (pérdida o atrofia de las alas); simplificación, reducción o asimetrías en ciertos órganos internos (tubo digestivo, gónadas, glándulas endocrinas, etc.); cambios de la conducta (ausencia de ritmos diurnos y estacionales, fototropismo negativo o indiferencia a la luz, pausada exploración en la búsqueda de alimento y escasa agresividad depredadora, etc.).

La cadena alimenticia en las cavernas comienza por los descomponedores, que se encargan de transformar la madera, el guano, la vegetación en descomposición, cadáveres y otra materia orgánica para ser utilizadas por animales a niveles superiores. Aquí se incluyen, en el medio terrestre, las bacterias, protozoarios y hongos. Le siguen los saprófagos, pero también los coprófagos, necrófagos y pequeños omnívoros, como las cucarachas, mientras que en el medio acuático se incluyen copépodos, isópodos y moluscos, entre otros.

El tercer y más alto nivel lo forman los depredadores, que tienen numerosos representantes en las cuevas, como los murciélagos carnívoros, ratas, ofidios (culebras y majáes), peces, ranas y sapos, arañas, alacranes, ciempiés, hormigas y ectoparásitos de murciélagos y ratas.

De acuerdo con sus hábitos de vida, cada especie animal ocupa uno o varios de los estratos (techo, paredes, suelo, acuatorios) y zonas (entrada o de umbral, de penumbra y de oscuridad absoluta) de la cueva. Sin embargo, aunque algunos troglófilos son capaces de penetrar en la parte profunda de la cueva (que es la más estable climáticamente y la que además posee la mayor humedad), en esta proliferan los troglobios, pues es aquí donde hallan los máximos requerimientos ecológicos (lo cual no les impide, a veces, incursionar en otras zonas de la cueva).



Fig. 17. Araña de cueva (*Loxosceles cubana*).

Fauna cavernícola de Cuba

Cuba tiene el privilegio de contar con una rica y antigua historia bioespeleológica (Bioespeleología es la disciplina encargada del estudio de la biota cavernícola). Gracias a ello, Cuba dispone de un extenso inventario de la fauna de sus cuevas, aunque es justo reconocer la trascendental influencia que sobre este aspecto han desempeñado la Sociedad Espeleológica de Cuba (SEC) y la obra de Gilberto Silva Taboada.

Entre 1969 y 1973, auspiciadas por la SEC, se realizaron las expediciones bioespeleológicas cubano-rumanas, cuyos principales resultados se dieron a conocer en cuatro grandes volúmenes editados en 1973, 1977, 1981 y 1983, respectivamente. Por otra parte, Silva Taboada publicó en 1973 la *Sinopsis de la espeleofauna cubana*, obra que recopilaba toda la información divulgada sobre ese tema hasta 1970. Una segunda edición de esta obra, corregida y aumentada, vio la luz en 1988.

Tabla 3. Cantidad de especies troglobias descritas de Cuba.

Taxones (nombre común)	Terrestres (acuáticas)
CRUSTÁCEA	
Remipedia	(1)
Ostracoda	(5)
Copepoda	(18)
Mysidacea	(5)
Isopoda (cochinillas)	(7)
Decapoda (camarones ciegos)	(13)
Amphipoda	(3)
ARÁCHNIDA	
Acarí (ácaros)*	(1)
Scorpiones (alacranes)	1
Pseudoscorpiones (falsos escorpiones)	2
Amblypygi	1
Schizomida	4
Ricinulei	4**
Opiliones	5
Araneae (arañas)	
CHILOPODA	
Scolopendromorpha (ciempiés)	2
COLEMBOLLA (colémbolos)	7
INSECTA	
Thysanura (trazas o pececillos de plata)	3
Orthoptera (grillos de cueva)	4
Dictyoptera (cucarachas)	1
Coleoptera (escarabajos)	6
PICES	
Bythitiidae (peces ciegos)	(4)
Totales	48 (54)

* Omitidas las 10 especies de garrapatas del guano (*Antricola* spp.), cuyas larvas son parásitas obligadas de murciélagos.
** Incluidas tres especies nuevas en proceso de descripción.

Una mención especial merece la fauna de las cuevas calientes o cuevas de calor. Esta singular biocenosis se caracteriza por las extraordinarias poblaciones de numerosas especies guanófilas y guanobias que literalmente tapizan el suelo. El microclima peculiar (altas temperaturas y elevada humedad relativa del aire) depende de la densidad poblacional del murciélago *Phyllonycteris poeyi* y de las condiciones espeleomorfológicas de las galerías donde se forman estos bolsones de calor. A tales biocenosis siempre están asociadas las garrapatas del guano de los géneros *Antricola* y *Parantricola*, cuyas larvas son parásitas de los murciélagos, aunque las ninfas y los adultos son guanobias (esto es, restringidas al guano de los murciélagos, del cual es posible que se alimenten). Como regla general, cada cueva de calor posee una especie endémica de *Antricola*.

Los animales más comunes en las cuevas son los troglófilos, que superan la mitad de la comunidad cavernícola. Los menos comunes son los troglobios, los verdaderos cavernícolas que, en algunas cuevas de países templados pueden constituir hasta 20 % de la población total pero, en el trópico es posible que sean tan bajos como 5 % o resulten inexistentes. Una de las explicaciones para ello es el hecho de que la comida es más abundante en cuevas tropicales y la selección favorecería el desarrollo de un número importante de nichos mutuamente exclusivos, mientras que en las cuevas templadas la menor abundancia de comida obliga a los animales a explotar las pocas fuentes disponibles y sobrevivir adaptándose a condiciones extremas. Por ello, las cuevas se dividen en varias categorías ecológicas, a saber:

Oligotróficas. Caracterizadas por una escasez en la disponibilidad de recursos alimenticios en toda la cavidad. La temperatura es generalmente baja y, son por tanto, típicas de los climas templados.

Eutróficas. Muestran notable cantidad de sustancia orgánica de origen animal, constituida sobre todo, por guano de murciélago presente en colonias de centenares a millares de individuos. Son típicas de las regiones tropicales de baja altura, donde la temperatura es alta y puede superar la media anual de la región en que se encuentra la cueva.

Distrófica. Se caracterizan por grandes acumulaciones de detritos vegetales y pobres en guano u otros recursos de origen animal.

Mesotrófica. Forman un tipo intermedio entre los tres tipos precedentes.

Pecilotróficas. Presentan dos zonas separadas, una eutrófica y otra oligotrófica.

Como los principales factores limitantes del ecosistema cavernícola son siempre la comida y el agua, la mayoría de los organismos terrestres son estenohidróbicos, de manera que están restringidos a galerías donde no sólo hay suficiente comida sino también suficiente humedad, factores que determinan el grado de complejidad de la comunidad. La diversidad biológica subterránea está positivamente correlacionada con el contenido orgánico de los sustratos, y las cuevas que disponen de bajo suministro de comida tienen pocos habitantes.

Tabla 4. Estratificación y zonación de los organismos.

Estratificación /Zonación	Entrada (zona de umbral, zona liminar)	Zona subliminar (de penumbra)	Zona Interna (de oscuridad absoluta)
Techo	Mosquitos Polillas Avispas	Mosquitos Grillos Arañas	Murciélagos Grillos Arañas
Paredes	Milípedos Chipojos Centípedos Perritos de Costa	Golondrinas Grillos Perritos de Costa Milípedos	Grillos Milípedos
Piso	Ratas Moluscos Anfibios	Escarabajos Serpientes Anfibios	Escarabajos Anfibios

Nivel socioeconómico

Los primeros homínidos aparecieron sobre el globo terráqueo hace alrededor de 5,6 a 7 millones de años (MM), en un amplio territorio del continente africano que comprende a los actuales países de Etiopía, Kenia, Chad y el Sur de África. El término *homínido* se refiere a su uso más tradicional, que incluye a los fósiles de nuestra misma línea evolutiva y a los humanos actuales. Referencia obligada merece el reciente descubrimiento del denominado *Ardipitecus ramidus* que con una antigüedad de 4,4 millones de años habitaba un medio forestal en el curso medio del río Awash en el valle de Afar, Etiopía. Por su parte el *Australopitecus anamensis* con un fechado aproximado de 4,2-3,9 MM años habitó las áreas de Kanapoi y Allia Bay, a ambos lados de las márgenes del lago keniano Turkana.

Más recientes aún son los hallazgos de la mandíbula con un diente en el sitio Lothagam en Kenia que con una antigüedad geológica de 5,6 millones años podría pertenecer a un homínido, al igual que un cráneo bien conservado con dos fragmentos del maxilar inferior y tres dientes de un individuo que vivió probablemente hace 7 millones de años localizado en el desierto de Djurab en el norte de Chad, pero que dada la poca información publicada aún se conoce muy poco de ellos y de sí se deben incluir o no en nuestra cadena evolutiva. Hace cuestión de 18-20 años se modificó ese criterio –aceptado desde la década del 20 de la pasada centuria– que estimaba que los restos esqueléticos de papiones, gacelas y otros herbívoros aparecidos en el interior de las cuevas junto con los del *Australopitecus africanus*, en las localidades surafricanas de Taung y Sterkfontein, indicaba que estos habían llegado allí por las manos de fuertes cazadores ya adaptadas a la elemental manipulación de algunos artefactos.

Desde la más temprana infancia se ha dicho en repetidas ocasiones que los primeros hombres eran *trogloditas* que vestían con pieles de animales con los cuales libraban encarnizados combates. Muchos recordarán las impresionantes e ilustrativas imágenes de esos dos clásicos de la literatura científico popular *Como el hombre se hizo gigante* y *El Origen del Hombre* de los autores Mijail Ilin y Eugenii. Segal y de José Augusta y Zdenek Burian, respectivamente, en que se presenta a nuestros primeros ancestros enfrentando decididamente a las fieras del pleistoceno

(osos de las cavernas y mamuts) mucho mayores en tamaño y fortaleza o llevando sobre sus espaldas las presas luego de una ardua faena. Como se puede apreciar en las láminas, estos valientes cazadores se procuraban su alimento con los escasos recursos que tenían a su disposición como palos y piedras.

Pero la realidad fue totalmente distinta, ya que los estudios tafonómicos llevados a cabo por Brain, Berger y Clarke han demostrado que lamentablemente estos indefensos homínidos habían sido presa de depredadores más especializados como los leopardos y las águilas.

La *tafonomía* es una ciencia relativamente joven y es la rama de la paleontología que estudia los procesos que experimentan los restos orgánicos hasta su constitución en fósiles. Pongamos como ejemplo, para la mayor comprensión, el estudio de los hábitos alimenticios de alguna especie de felino como el león. El hecho de estudiar que porciones de la presa trasladan a su madriguera –después de la caza–, e incluso en el período de cría de los cachorros, permitirá conocer qué encontrarán los investigadores y con ello evitar deducciones erradas como la de los prestigiosos autores ya mencionados.

Como se ha podido comprobar entre los 3-2 millones años los *Australopitecus africanus* caminada por los bosques o matorrales secos con espacios abiertos africanos en busca de los desperdicios de la caza de los auténticos cazadores: los lobos, lince, tigres y las hienas entre otros. Por ello son considerados sencillos carroñeros que vivían a expensas de la agilidad y destreza de los que dominaban el espacio ecológico que lo rodeaba, dada su incapacidad para el enfrentamiento directo.

Todo parece indicar que hace cuestión de 800 mil años el *Homo antecesor* –que habitó el continente europeo antes de la aparición del conocido Hombre de Neandertal– empleó las cuevas de la Sierra de Atapuerca, España como una forma elemental de cementerio.

Uso social de las cavernas

Habitacional

Como se ha comprobado en los albores de la humanidad nuestros antecesores empleaban las cuevas ocasionalmente, permanecían en ellas por poco tiempo durante el cual construían sus útiles, descuartizaban sus presas y finalmente las abandonaban. Uno de los casos más recientes y de mayor antigüedad que lo demuestra es la Gran Dolina en la Sierra de Atapuerca, muy cerca de la ciudad de Burgos, España. En esta cueva se han localizado restos de al menos 6 individuos de diferentes edades, mezclados con restos de animales e instrumentos de la industria lítica; todos bastante rotos y algunos, incluso, presentaban estrías de corte producidas por instrumentos de piedra con el propósito de separar la carne del hueso. Todo esto indica que fueron consumidos en el lugar por otros humanos. Su antigüedad ha sido datada en unos 800-750 mil años y se han clasificado como pertenecientes al *H. antecesor* –especie de homínido intermedia entre el *H. erectus* y el *H. neandertalensis*.



Fig. 18. Pictografía representada en una caverna cubana que los especialistas denominan como “La Serpiente”.

En la misma medida en que el hombre comenzó a identificar los frutos que no eran nocivos para la alimentación y a domesticar el fuego, buscó refugio contra las inclemencias del tiempo —la lluvia, el frío, el viento y lo que es peor aún, los depredadores— en cuevas y abrigos rocosos cercanos, en la generalidad de los casos, a las corrientes de agua.

Son innumerables los reportes internacionales que atestiguan la afirmación anterior pero serán empleadas las múltiples localidades del territorio nacional para ejemplificarlo.

Las primeras evidencias de la permanencia de nuestros antiguos pobladores en los espacios cavernarios la proporciona el más importante de los cronistas para las Antillas en los momentos iniciales de la Conquista, el padre Las Casas... *en una provincia al cabo della, los cuales son como salvajes, que en ninguna cosa tratan con los de la isla, ni tienen casas, sino que están en cuevas continuo, sino es cuando salen a pescar...* (Las Casas, 1958).

Aún cuando ésta es la primera referencia escrita de la habitación en cuevas para nuestro país, los estudios arqueológicos han podido demostrar que mucho antes —hace aproximadamente 6 mil años— un grupo de cazadores arcaicos (paleolítico) habitaba los farallones de Levisa en la zona de Mayarí, Holguín. Estos hombres dominaban la industria macrolítica con una amplia gama de artefactos y útiles. Las tallas de puntas de proyectil alcanzaban hasta los 35 cm.

Los seres que más evidencias de ocupación en grutas han proporcionado hasta el momento son los denominados pescadores-recolectores-cazadores (preagro-alfareros, Guayabo Blanco, mesolítico), mencionados por Las Casas, que comienzan a poblar todo el occidente de nuestro territorio hace unos 4 mil años y tenían una industria básicamente de concha.

Estos hombres hicieron un amplio uso de las cuevas o espeluncas no sólo como habitación, si no también como cementerios y centros de culto. Sus huellas se pueden encontrar en las cuevas en la línea de la costa e incluso hacia tierra adentro; vinculado con el ciclo reproductivo de las plantas, la temporada de invierno y los huracanes.

Con posterioridad —y que se sepa son los últimos en emplear las grutas como sitio de habitación— se establecen otros grupos con el mismo modo de producción —pescadores-recolectores-cazadores— pero que ya dominan la técnica de la piedra en volumen y poseían otras concepciones ideológicas, los llamados Cayo Redondo. Estos se caracterizaban por producir instrumentos de esmeralda simetría como morteros, majadores y unas piezas muy singulares vinculadas con sus ritos y creencias como las dagas, esferas y discos líticos.

Ceremonial

La oscuridad de los espacios cavernarios, su casi eterna tranquilidad y silencio —sólo transgredido en determinados horarios, por las colonias de murciélagos que en ellas habitan— las curiosas maneras de las formaciones secundarias que en ocasiones se antojan representando a personajes mitológicos o que sus sombras aparentan las más disímiles y extrañas criaturas salidas de nuestra imaginación debieron llamar poderosamente la atención del aún indefenso homínido.

Los hombres se procuraron determinados espacios en el interior de las cuevas donde poder realizar, con suficiente privacidad, sus ceremonias y ritos mágico-religiosos. Es importante destacar que históricamente los especialistas han definido una cueva o espelunca como *ceremonial* cuando en ella se localizan claras evidencias de este tipo de práctica ya sea por la concentración de pictografías, petroglifos o la combinación de ambas en sus salones o galerías; lo cual no quiere decir que siempre que se encuentre de forma aislada este tipo de manifestación se estará en presencia de ellos.

En sus salones y galerías decoradas se han encontrado restos de animales que se asocian a ceremonias propiciatorias. Como todos los pueblos de la comunidad gentilicia, los aborígenes que poblaron a Cuba tenían sus

centros de culto y adoración. Los hombres que se asentaron en esta pródiga tierra no constituyen, pues, una excepción. Sin embargo, son pocas las espeluncas que en nuestro país son reconocidas como *santuarios profundos*, entre las que se pueden mencionar Cueva Plana y Pluma, ambas en la llanura costera norte de la provincia de Matanzas donde se ha localizado el *estilo errático* compuesto por trazos de color negro formando manchas, líneas rectas, curvas, entrecruzadas, que no guardan un orden aparente y parecen seguir las formas y sinuosidades de la pared o soporte.

Resulta muy probable que estas manifestaciones se encuentren asociadas a los grupos pescadores-recolectores-cazadores (preagro-alfareros o Guayabo Blanco), por la factura, falta de pericia y dominio demostrados por sus creadores, fácilmente comparable con hechura de las cuentas de collar ejecutadas en concha. Otras veces, según estudios realizados, estos centros se localizan en lugares abiertos, espaciosos e iluminados, de forma directa o indirecta por la luz solar; también en los salones de acceso a las grutas y, muy escaso, en las galerías de tránsito. Como se evidencia la selección de estos espacios no era arbitraria y casi seguro que correspondía al brujo, behíque o shamán escoger correctamente el sitio donde desarrollar estas transcendentales actividades de las que dependía la integridad y prosperidad del grupo. Los descubrimientos arqueológicos, confirman que éstos preferían los oscuros y enigmáticos aposentos donde la naturaleza hizo confluír las espaciosas dimensiones de la gruta, lo intrincado del paraje en la cual está asentada y aquellas cavidades con espléndidos contrastes de luces —al paso por la bóveda celeste del sol y su eterna compañera la luna— a través de las entradas, claraboyas o dolinas que perforan sus techos; en no pocas ocasiones también son abundantes los estanques o gours, que acumulan una cantidad considerable de agua.

En distintas regiones de nuestro país se han ubicado cuevas que por la magnitud y complejidad de los diseños realizados se evidencia una marcada intencionalidad por perpetuar el significado de las actividades que en ellos se desarrollaban. Así, cada uno de los motivos y representaciones ejecutados en las cuevas y solapas resultaban un acto de legitimación y establecimiento de las fronteras territoriales de sus espacios temporales de autoridad y poder.

En este tipo se pueden mencionar como los horados más representativos en nuestro país las Cuevas No. 1 de Punta del Este, Ambrosio, el Indio y la Caverna de Patana, la primera de ellas ubicada en la Isla de la Juventud, la segunda en la llanura costera norte de Matanzas y, en Camagüey y Guantánamo, respectivamente, las dos últimas.

Don Fernando Ortiz, cuando la descubre en 1922, realiza un minucioso estudio de los dibujos e intenta por primera vez desentrañar los posibles significados de los motivos de círculos concéntricos bicromados o monocromos representados en la Cueva del Humo, de Isla o de Punta del Este, como también se le conoce. En aquel entonces, el sabio cubano relaciona el número de círculos y su coloración con fenómenos siderales como los ciclos lunares y la posición ocupada en el zenit por el astro rey durante los equinoccios y solsticios, y establece la posible relación de los dibujos con las figuras formadas por las constelaciones. Cuatro décadas más tarde, el doctor Antonio Núñez Jiménez, siguiendo la ruta del maestro comprueba cómo el sol durante el año se mueve por distintas posiciones a lo largo del espacio correspondiente a la entrada de la cueva ocupando los extremos de la abertura durante los solsticios y el centro de ésta en los equinoccios iluminando a su paso diversas pictografías. Es común la interpretación de estar en presencia de un centro ceremonial u observatorio astronómico para el cómputo práctico de los primitivos pobladores o el límite inicial del cálculo utilitario.

Los importantes centros ceremoniales que se localizan a lo largo y ancho de nuestro archipiélago están asociados en el primer caso a los grupos pescadores-recolectores-cazadores con posible agricultura esporádica y los restantes, a los agricultores-ceramistas.

En Cuba, todos los grupos, sin excepción, emplearon los espacios cavernarios para enterrar a sus muertos. Los pescadores-recolectores-cazadores en algunas ocasiones realizaban esta práctica en sus propios sitios de habitación. En muchas de ellas se localizan los enterramientos en forma individual y en otras, colectiva o combinadas incluso. Asimismo, existe un conjunto de cuevas sepulcrales que se agrupan bajo la denominación de “Necrópolis”, del griego “Nekropolis”: ciudad de los muertos, cementerio. Es internacionalmente conocido este término para denominar aquellos lugares que pueden tener la forma de hipogeo, dolmen, túmulo, catacumba, montículo, etc.; éstos, pueden ser de incineración o de inhumación. Se decidió usar esta acepción para aquellas grutas funerarias en las cuales sus recintos fueron empleados de manera continuada por el hombre primitivo sólo con la finalidad de dar sepultura a los cadáveres de sus coterráneos; lo cual quiere decir que no se utilizaron, ni como sitios de habitación, ni como talleres u otro uso cualesquiera. El hecho, de inhumar los restos, en los sitios de habitación, junto a los residuos del quehacer doméstico diario, parece haber sido un hábito de los grupos más tempranos, con un modo de producción pescador-cazador-recolector, los que de manera frecuente hacían las tumbas junto a los fogones y desperdicios de la dieta, al respecto es posible citar el ejemplo de la solapa de Canimar Abajo, en Matanzas.

En dichos sitios se localizan restos óseos humanos, unos parcial y otros totalmente cremados, pero los estudios desarrollados empleando la escala termocalorimétrica, así como las inferencias asociadas a la ubicación que éstos tenían en relación con los fogones localizados en el sitio, permitió determinar que el material esquelético sólo permaneció expuesto al fuego de forma inconsciente. Este, sin embargo, no parece ser el caso de las cuevas de Los Huesos y Funeraria No. 3, de Caleta y Patana, respectivamente, ambas en la provincia de Guantánamo, donde se hallaron gran cantidad de restos humanos cremados y muy fragmentados, asociados a una gran cantidad de ceniza, lo cual provocó que el arqueólogo norteamericano Mark Raymond Harrington, en su momento, las clasificara como “sitios de cremación o depósitos de restos humanos” (Harrington, 1935).

Los yacimientos de las comunidades pescadoras-cazadoras-recolectoras mejor estudiados se encuentran en la porción occidental del país como Las Cuevas Calero, en Matanzas; La Santa en Ciudad de La Habana; El Infierno y de la Caña Quemada, en La Habana, por sólo citar algunas.

Uno de los ejemplos más interesante es la cueva del Perico, en Pinar del Río excavada por los Investigadores Enrique Alonso y Milton Pino. Este yacimiento perteneciente a los grupos con modo de producción pescador-recolector-cazador tiene la particularidad de haberse explotado como sitio de habitación y cementerio. En las dos primeras campañas de excavación durante 1970, en él se localizaron los restos de unos 36 individuos, de los cuales 17 eran niños y 19 adultos; posteriormente en el año 1972 prosiguieron los trabajos hasta completar la cifra de 51.

Los entierros ubicados en los niveles más tempranos —ocho adultos y tres de infantes— se habían ejecutado bajo la práctica de enterramiento secundario en paquete, algunos presentaban huellas de colorante rojo y además estaban acompañados de abundantes cuentas de collar elaboradas en concha que probablemente formaran parte de las ofrendas funerarias junto con restos de dieta y algunos artefactos. También llamó la atención de los investigadores la presencia de paquetes rodeados por piedras de pequeño tamaño y que algunos descansaran sobre capas de la concha del *Isognomon alatus*. Los paquetes eran muy singulares, pues mostraban el cráneo al centro y los huesos largos por debajo y alrededor. Esta organización de los restos esqueléticos recuerda en alguna medida el exclusivo y singular paquete localizado en la Cueva de Florencio, que será comentado más adelante. Los restantes individuos, que aparecían en los niveles más tardíos del sitio, guardaban su estructura anatómica en posición decúbiteo supino, decúbiteo lateral y prono. En al-

gunas ocasiones sus extremidades superiores e inferiores permanecían flexionadas. Un número importante de estos enterramientos cumplía con patrones ya establecidos para los anteriormente descritos como que reposaban sobre una capa de caracoles de varias especies pero con predominio de *Isognomun alatus*; así como que aparecían posibles ofrendas de cuentas de collar ejecutadas en concha y vértebras de pescado.

Por su parte en la Cueva de Florencio, en el poblado de Carboneras, Matanzas, los destacados doctores Herrera Fritot y Rivero de la Calle excavaron, en el salón de entrada, un enterramiento secundario que estaba compuesto por tres cráneos dispuestos en forma triangular, equidistantes uno del otro, entre ellos se encontraron los huesos largos y por debajo de este conjunto un cuarto cráneo mirando hacia la bóveda del salón. Este importante registro estaba acompañado por restos de abundante dieta e instrumental de concha que lo asocian a los grupos de economía apropiadora.

Es muy probable, pero aún está por demostrar, que las últimas oleadas migratorias de los grupos agricultores que arribaron a nuestras costas, y que además, se asentaron en la región más oriental del país, hicieran de las cuevas necrópolis sus centros ceremoniales, donde profesar su culto a los muertos; en particular las cuevas de Waldo Mesa y El Jobo, ambas en la provincia de Holguín, la Caverna de Patana, en Maisí, Guantánamo. En los recintos antes mencionados se han localizado numerosos petroglifos en sus paredes y formaciones secundarias, lo que es muy probable que estuvieran asociados a los cultos a los muertos (Fernández y González, 1997). A mediados de la década de 1990 un equipo de investigadores dirigido por los doctores José M. Guarch y José Jardines localizaron en la región de Santa Cruz, en la provincia de Granma, la Cueva Funeraria No. 2 del Guafe que cumple también con estas características.

Los grupos agricultores sostenían ritos y costumbres de una tradición totémica de carácter gentilicio, donde se mantienen los vínculos de consanguinidad familiar; además de que ya las comunidades con este modo de vida, poseen un predominio de los cultos tribales, lo que ocasiona un mayor énfasis en el ceremonialismo. Las prácticas funerarias realizadas en las cuevas por los grupos de modo de producción agricultor-ceramista fueron muy disímiles, ya que se encuentran sitios como en la Cueva Bélica en Holguín, donde los cuerpos fueron arrojados por las dolinas o claraboyas con las ofrendas que en este caso particular incluía vasijas de cerámica y un importante número de ejemplares de perros.

TÚNELES: UN CASO PARTICULAR DE CAVIDAD ARTIFICIAL

Breve historia de la construcción subterránea

La historia del arte de la construcción subterránea se remonta a los tiempos prehistóricos cuando el hombre primitivo, buscando resguardo contra las inclemencias del tiempo y de sus enemigos, excavó cavidades a semejanza de las naturales y acondicionó estas últimas. Hay amplia evidencia arqueológica para indicar que se excavaron cavidades subterráneas ya en la edad de piedra en la búsqueda y explotación de minerales. Estos frentes primitivos ya eran de sección transversal circular y revelan un cierto modelo regular.

El túnel más viejo, como ejemplo de estructura subterránea fabricada para el propósito expreso de comunicación fue construida, según el conocimiento actual, hace 4000 años bajo el reino de la Reina Semiramis, en la Babilonia antigua, para pasar bajo el lecho del río Éufrates y establecer una conexión subterránea entre el palacio real y el Templo de Júpiter. La longitud de este túnel era de 1 km y se construyó con unas dimensiones considerables de sección transversal, 3,6 m por 4,5 m. El río Éufrates se desvió de su lecho original durante el periodo de la construcción del túnel, que se hizo en un corte a

cielo abierto, lo que es un proyecto significativo, incluso según las normas modernas.

La pared del túnel consiste en un enladrillado colocado con mortero bituminoso y la sección se cubre por encima con un arco abovedado. El alcance y magnitud de la tarea hasta un punto tal, hace pensar que este túnel no era el primero de su tipo construido por los babilonios, y que ellos deben haber adquirido habilidad y practicado con varios túneles construidos antes. Para apreciar la grandeza de la tarea se debe recordar que el próximo túnel subacuático se abrió aproximadamente 4000 años después, en 1843. Éste fue bajo el río Támesis en Londres.

Luego se utilizaron numerosos túneles con propósitos militares para minar las murallas de fortalezas hostiles, y abrir accesos a través de ellas en el interior de pueblos sitiados. Los túneles construidos con fines de minado o paso bajo las fortificaciones son también un rasgo importante en el arte militar de griegos y romanos.

El túnel de 200 m de largo, construido hace 2730 años, con dimensiones interiores de 0-7 m por 0-7 m, por Hezekiah, Rey de Judea, en Jerusalén para conducir el agua de un manantial cercano al pueblo tenía también propósitos militares, pues fue construido por miedo al sitio inminente por el ejército Asirio. El túnel de griego más famoso está en la Isla de Samos. Se construyó hace 2630 años para el suministro de agua con una longitud de aproximadamente 1,5 km y 1,8 m por 1,8 m de dimensiones interiores.

También adquirió gran fama y reputación en tiempos de los griegos y romanos la construcción de túneles de acueducto. De éstos es el túnel de suministro construido en el reino del emperador Hadrian hace 1830 años en Atenas, el cual se reconstruyó en 1925 y todavía está en operación hoy para el suministro de agua a la ciudad.

El primer túnel de vía férrea para la operación de un ferrocarril arrastrado por caballos se construyó en Francia en 1826 en la línea de Roanne-Andressieux. El primer túnel de vía férrea para tracción de vapor se ejecutó entre 1826 y 1829 para la Línea Liverpool-Manchester.

La rápida evolución de la red de vías férreas y el reconocimiento de su tremenda importancia en el establecimiento de contactos en amplias esferas de la vida en una

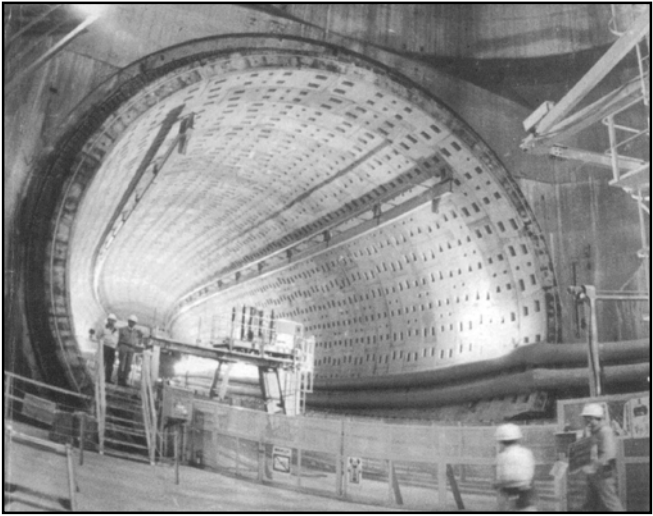


Fig. 19. Túnel ferroviario en construcción revestido con dobelas.




Fig. 19a. Túnel ferroviario terminado, recubierto con dobelas.

región llevó a la necesidad de construir túneles bajo las grandes cordilleras. La realización de estos proyectos gigantescos de túneles, involucrando la perforación de varios kilómetros de roca dura, habría sido imposible sin el desarrollo y aplicación de nuevos métodos de excavación de roca y de construcción subterránea en general.

Fue durante la construcción del túnel de Mont Cenís, entre Francia e Italia, comenzado en 1857, que la perforación hidráulica de la roca se introdujo y reemplazó por la perforación neumática mejorada por George Sommeiller. La dinamita se inventó aproximadamente al mismo tiempo, en 1864, por Alfred Nobel. Como resultado de las nuevas técnicas el túnel de 12,8 km de largo fue abierto al tráfico en 1871. El desarrollo de las técnicas de construcción de túneles permanecerá asociado a los famosos túneles de los Alpes (en Suiza los túneles del Gotardo, Simplón y Lotschberg; en Austria los de Semmering, Tauern, Karawanken y Ariberg), y después con los italianos (Ronco, Col di Tenda, Monte Adone, etc.).

La construcción del primer túnel bajo el río Támesis en Londres, se empezó por primera vez en 1807, pero pronto fue inundado y se abandonó. El trabajo de la construcción se reasumió sólo 15 años después por el ingeniero Brunel que usó el escudo inventado por él. Después

Tabla 5. Túneles relevantes del mundo.

Túnel	Ubicación	Fecha	Longitud en km y otras características
Túneles de carretera			
Lærdal ¹	Noruega, entre las localidades de Aurland y Lærdal	2000	24,5
San Gotardo	Suiza, entre los cantones de Tesino y Uri	1980	16,3
Seelisberg	Suiza	1980	2 tubos de 9 km cada uno
Arlberg	Austria	1978	13,97
Fréjus	Entre Modane (Francia) y Bardonecchia (Italia)	1980	13
Mont Blanc	Entre Chamonix (Francia) y Courmayeur (Italia)	1965	11,6
Kan-etsu	Japón	1985	10,88
Ena-san	Japón	1975	8,4
Sainte-Marie-aux-Mines	Francia, entre Saint-Dié y Sélestat	1976	6,95
Bielsa	Entre Saint-Lary (Francia) y la provincia de Huesca (España)	1976	3
Yerba Buena ⁵	Atraviesa la Isla de Yerba Buena en la Bahía de San Francisco	1936	0, 165 de largo, 23 m de ancho por 15 m de alto. Tiene dos pisos
Túneles ferroviarios			
Seikan ²	Japón	1988	53,85
Canal de la Mancha (submarino) ³	Entre Coquelles (Francia) y Cheriton (Inglaterra)	1994	50,4
Dai Shimizu	Japón	1980	22,23
Simplón	Suiza	1906	19,8
Shin Kanmon (submarino)	Japón, entre las islas de KyLûshû y Honshû	1975	18,7
de los Apeninos	Italia, entre Florencia y Bolonia	1934	18,5
San Gotardo	Suiza	1882	15
Lotschberg	Suiza	1913	14,6
Mont Cenís ⁴	Bajo el pico de Fréjus, en la frontera franco - italiana	1871	13,7

¹ El túnel de carretera más largo del mundo.
² El túnel ferroviario más largo del mundo.
³ El túnel submarino más largo del mundo.
⁴ En 1980 se abrió un túnel de carretera paralelo de 12,800 m de longitud.
⁵ Es el de mayor diámetro del mundo.

de muchas dificultades provocadas por varias entradas de agua e inundaciones de los frentes, el túnel de doble vía y 150 *m* de largo bajo el lecho del río y con 6,7 por 11,3 *m* de sección transversal se completó en 1842. El primer escudo de Brunel era rectangular y el túnel estaba revestido con albañilería de ladrillos.

El método de construcción que involucra el uso de un escudo cilíndrico fue mejorado grandemente por Greathead que lo empleó con éxito en Londres en 1869 para la construcción del Túnel de la Torre, en el que ya se usaron segmentos, dovelas, de hierro fundido. Un túnel pedestre se construyó casi en simultáneo en la ciudad de Nueva York por BEACH, también usando el método del escudo.

Las mayores velocidades de ejecución se han logrado mediante las tecnologías de Topos TBM, con velocidades para diámetros de 10 *m* de más de 50 *m* diario. Compare los 0,9 *km* por año del Mont Cenís, con los 4,3 *km* / año del Nuevo Túnel de la Cascada en los Estados Unidos, en 1927. Esta diferencia en avance se debe sobre todo al aumento de los frentes de ataque y al abandono de los métodos mineros convencionales y progresivamente la introducción de maquinaria mayor específica como los jumbos por ejemplo. En el Eurotúnel, para los túneles de servicio se lograron avances promedio de cerca de más de 12 *km* / año entre 1987 y diciembre de 1990. Este proyecto ha sido la aventura más atrevida de construcción de túneles. La tendencia moderna de esta actividad comprende los de: vía férreas, carreteras, metros, suministro de agua, evacuación de aguas, hidroeléctricas, túneles de servicios público (redes eléctricas telefónicas, hidráulicas y otras), estacionamientos, tiendas y almacenes subterráneos, almacenes de combustible, de medios valiosos, y refugios.

En Cuba, aunque no hay gran tradición, se puede hablar de alguna experiencia en obras subterráneas. Empecemos por la minería. El ejemplo clásico de esto es la hoy paralizada mina de Matahambre con una profundidad superior a los 1500 *m*, más de 70 *km* de galerías, 4 pozos y uno interior, ciego. La obra subterránea fundamental de la mina, es una gran cámara, con revestimiento de acero y madera hasta donde se trasladó, seccionado y se montó un cabestrante para operar la jaula del pozo 5, ciego.

En el siglo XVIII los ingleses excavaron un túnel para minar la muralla del Castillo de los Tres Reyes del Morro y poder tomar la plaza, valientemente defendida. La operación tuvo éxito. En túneles viales en el siglo XIX se construyó el de Ferrocarril de Gibara de algunas decenas de metros y sin revestimiento. Otro túnel vial, de carretera, se ejecutó en la primera mitad de la década del 60 del siglo pasado con unos cientos de metros y doble vía, en las inmediaciones del pueblo de Alto Songo. Para ello, la excavación se hizo por perforación y voladura y se utilizó revestimiento prefabricado.

A finales de la década de los 50 y principio de los 60 del siglo pasado, se construyó la hidroeléctrica del Hanabanilla, con una cámara subterránea grande. La excavación se hizo por perforación y voladura. Su revestimiento se llevó a cabo con métodos que son modernos aun hoy día. Cuenta con un túnel de servicio excavado a 45°, un pozo vertical de toma y el túnel de descarga de más de 7 *km* de longitud, excavado en esquistos y con tramos mínimos revestidos.

Como ejemplo de obras de abasto hidráulico hay tres túneles que presentan cierto interés, dos de pequeña sección: el del Acueducto Albear en Ciudad de La Habana, del siglo XIX y el de abasto a Santiago de Cuba de la presa Charco Mono, de la década del 30 del siglo pasado. Ambos tienen varios cientos de metros y una sección transversal mínima. Uno más reciente, de abasto a Santiago de Cuba, de sección media, y 2 *km* de longitud se construyó en la proximidad de Ramón de Guaninao, para conducir agua de la presa Carlos Manuel de Céspedes hacia la ciudad de Santiago de Cuba, a mediado de los años 90 del siglo pasado. La excavación de la sección, de 4 *m* de ancho, por necesidades tecnológicas, se hizo mediante rozadora, perforación y voladura. Se revistió parcialmente, solo donde era necesario, utilizando hormigón proyectado.

Una obra importante de evacuación de aguas albañiles, fue el túnel para el sifón construido bajo la Bahía de

La Habana, en arcillas, usando el método de cajón neumático para evitar la entrada del agua y mantener estable el frente y la excavación. La obra tiene una sección transversal de 2,13 *m* de diámetro y 375 *m* de largo. Se comenzó el 1º de mayo de 1911 y se terminó el 19 de abril de 1912. Durante la ejecución, producto de un sondeo de exploración mal obstruido, se produjo la fuga del aire comprimido que provocó la inundación de la cámara y la muerte del turno de trabajo. En febrero de 1997, la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC) seleccionó al túnel y el sifón como una de las Siete Maravillas de la Ingeniería Civil Cubana de todos los tiempos. En la década del 50 se emprendieron tres importantes obras viales en la Ciudad de La Habana. A continuación se ofrece una pequeña reseña de ellas.

Túnel de Línea

Al comenzar la década de los años cincuenta del siglo XX, se hizo evidente la necesidad de mejorar las comunicaciones con los repartos situados al oeste de La Habana. La vía tenía que cruzar el río Almendares y no interrumpir el paso de las embarcaciones, por lo que se pensó en dos variantes, un puente tradicional o un túnel. Dado que la envergadura de los yates veleros podía llegar hasta los 90 pies, era necesario un puente de 1 300 *m* de largo con una pendiente de 5 %, lo que significaba que saldría desde la calle 14 del Vedado hasta la calle 10 de Miramar, y su costo se calculó aproximadamente igual al de un túnel, por lo que escogió por la segunda variante.

El proceso de construcción requería que estuviera seco el fondo de la excavación, lo que se dificultaba, pues la parte más baja estaba 13,60 *m* por debajo del nivel del agua del río; para conseguirlo se construyó una ataguía de tablestacas de acero que limitaba el área donde se trabajaba. En la zona de Miramar, donde el suelo es muy blando hasta gran profundidad, se empleó el sistema de múltiples pozos tubulares (*wellpoints*), los que al bombear el agua deprimían el manto freático. Para no interrumpir la navegación, el túnel se hizo en dos etapas desde ambas márgenes. La capacidad del túnel se calculó de 2 500 vehículos por hora por senda.

Túnel de la Bahía

La comunicación entre La Habana y la parte situada al este de la bahía se había estudiado desde principios del siglo XX y según el ingeniero José Menéndez, hasta llegó a iniciarse la construcción de un puente para atravesar la bahía, pero su alto costo y los limitados medios técnicos de la época impidieron su realización. La ubicación del Túnel exigía que cumpliera varias premisas:

- Estar alejado de zonas de gran congestión del tránsito.
- Facilidad de distribuir el volumen de vehículos a distintas zonas, sin interceptar calles congestionadas.
- Necesidad de realizar pocas expropiaciones.
- No hubiera grandes diferencias de calidad del subsuelo contra otras posibles ubicaciones.
- Permitiera el paso a embarcaciones de hasta 14 *m* de calado.

La capacidad del túnel se estudió para 1 500 vehículos por hora y por senda. Con dos conductos de 7 30 *m* de ancho cada uno, dos sendas y una pendiente máxima de 5,75 %. Se trató también de reducir al mínimo la longitud del túnel, que sólo alcanzó 733 *m*, al construir ambos accesos a cielo abierto, eso permitió que el tiempo para atravesar el túnel fuera de sólo 44 *seg* a 60 *km* por hora. Las calas ejecutadas en las distintas zonas denotaron que el suelo estaba formado por roca coralina con intrusiones de material blando y muchas oquedades y fisuras que lo hacían permeable, por lo que se realizaron 56 *km* de perforaciones hasta profundidades de 20 *m* y se inyectaron 30 mil toneladas de cemento, bentonita, silicatos y arena. Los trabajos para el dique seco requirieron la excavación de 400 mil *m*³ en roca. También fue necesario dragar en el lecho para formar la trinchera donde

se colocarían los cajones de la parte prefabricada del túnel, para lo que se removieron 250 mil *m*³ de roca y 100 mil *m*³ de material arenoso.

Túnel de Calzada

Aunque al comienzo de la década del 50 del siglo XX se había construido el túnel de la calle Línea, ya en los finales de la misma se hacía verdaderamente imprescindible la sustitución del Puente de Pote. Este puente basculante y de sólo dos vías, tenía que levantarse cada vez que pasaba un yate de los que fondeaban en el río Almendares, lo que ocasionaba continuos tranques de más de un kilómetro en la Quinta Avenida y en la calle Calzada. Sobre esta problemática se había estudiado un puente, pero la presencia en La Habana en estos años, de la empresa francesa que construyó el túnel bajo la bahía, con los técnicos, mano de obra especializada, equipos y un dique seco construido para realizar dicho túnel, hizo que se decidiera esta variante por resultar mucho más económica y eficiente que la del puente. Para su emplazamiento se estudiaron dos alternativas, enlazar el Malecón con el punto de confluencia en “La Puntilla” de las avenidas Primera y Tercera en Miramar o unir la Quinta Avenida con la calle Calzada y el Malecón, en la misma posición donde se encontraba el puente de Pote, aunque esta solución requería demoler el puente y extraer los pilotes hincados en ambas orillas para sus pilas y estribos.

Un esfuerzo significativo y masivo se ha hecho en los últimos años en la construcción de túneles populares, de refugio, para la protección de la población en caso de una agresión militar del gobierno de los EE.UU. A finales de la década del 80 del siglo pasado y principio de los noventa, se hizo la investigación y proyección, y se comenzó la construcción del llamado Trasvase Este a Oeste que tiene como objetivo conducir el agua del río Mayarí hasta el Valle del Cauto y Tuinas, en una primera etapa y luego llevar hasta ese valle el agua del río Sagua de Tánamo. Este proyecto cuenta con un importante conjunto de túneles. Se detuvo por la situación económica del Período Especial. De igual forma se detuvieron los túneles viales en el circuito sur de las provincias de Santiago de Cuba y Granma, en Palma Mocha y Cotobelo.

Cavidades artificiales y sistema soporte

Probablemente la primera construcción realizada por los humanos fue la subterránea. Cuando el hombre primitivo intentó la vida troglodítica y para ello comenzó a mover los bloques que le molestaban o acondicionó la entrada de la caverna para evitar las pérdidas de calor y aumentar su seguridad, inició la construcción subterránea. De todas sus obras ninguna tiene una vinculación tan estrecha con el ambiente geológico como las subterráneas.

Toda obra es una solución de compromiso entre un medio natural existente, y un medio técnico, diseñado y construido por el hombre, para crear un nuevo sistema: el técnico-natural. En el caso de la subterránea este compromiso es mucho más delicado, pues en general el conocimiento del medio es limitado. En la obra superficial el ambiente que la rodeará es completamente conocido en todas sus partes y se pueden estimar cuales son sus variaciones fundamentales. Aun en los casos menos predecibles como la ocurrencia de un sismo o la de un huracán se sabe, sin embargo, cual es la intensidad que debe esperarse y para que grado de probabilidad. En este caso, el elemento menos conocido, aunque aparentemente es inmediato, es la relación de la obra con el suelo, la cimentación. De lo expuesto se derivan tres conclusiones importantes:

- El sistema natural, por sus propias características, es de un enlace informático inverso, lo que significa que una vez ocurrido un evento natural es posible establecer las causas que lo provocaron; pero lo contrario, dada las causas, llegar a una conclusión única, no. Sólo se pueden hacer pronósticos con una determinada probabilidad de certeza, nunca absoluta.

De este modo, la única forma de optimizar el comportamiento del medio natural existente, frente a la obra a construirse, es su investigación y conocimiento, que permita pronósticos cada vez más acertados de su comportamiento ante la demanda que hará de él la nueva construcción, para determinar la magnitud del impacto, si este resulta soportable o no y qué medidas habrá que tomar para amortiguarlo, incluyendo posibles cambios de ubicación de la misma.

- El sistema técnico, sin embargo, no existe. Nace primero en la imaginación de los que lo proyectan. Su optimización es completamente del dominio del diseño. Los materiales son bien conocidos, al igual que su disposición y relaciones. Por ello es posible saber, con suficiente precisión, que va a ocurrir ante cualquier situación, de modo que, dadas las causas, se establecen las consecuencias.
- El nuevo sistema, el técnico-natural, heredará las propiedades de sus componentes y su mayor eficiencia se alcanza cuando el medio natural logra satisfacer lo que de él demanda el medio técnico. La optimización depende en gran medida del emplazamiento del medio técnico en el natural, es decir, que se haga la mejor ubicación posible.

Solución a los problemas técnicos del medio subterráneo

Los túneles y cavidades, en general, se complementan con los llamados sistemas técnicos que incluyen la alimentación energética, ventilación y climatización, si es necesaria, iluminación, señalización y drenaje. Pueden estar dotados de puertas herméticas para prevenir inundación o como parte de la protección y sistemas específicos de vigilancia y protección. Las características de los sistemas técnicos varían en dependencia del tipo y destino que tenga la obra. No es igual un túnel vial corto de escaso tráfico que un túnel para una autopista de gran flujo, o un túnel de abasto hidráulico, que una obra de alta protección y seguridad o un almacén refrigerado.

CARSO Y YACIMIENTOS MINERALES SÓLIDOS EN CUBA

Los recursos minerales asociados con los procesos cársicos son muy importantes si se tiene en cuenta que grandes yacimientos de bauxitas, la única mena de aluminio, se encuentra estrechamente ligada con éstos, además representan una de las principales fuentes de plomo y zinc. Relacionadas con la mineralización intracársica se ha desarrollado la provincia de fluorita mayor del mundo: "La provincia de fluorita de la Sierra Madre Oriental en Méjico". La definición y búsqueda de dichos yacimientos en Cuba es de vital importancia, pues alrededor de 65 % del territorio nacional es cársico y, asociado a este fenómeno, se encuentran yacimientos y manifestaciones de bauxitas, manganeso, arcillas, fosforitas, calcedonia y ópalos, turba, y no se descarta la posibilidad de hallar mineralizaciones plumbo-zincosas y más raramente de vanadatos de uranio. El estudio de los yacimientos de minerales sólidos relacionados con los procesos cársicos y paleocársicos servirá en un futuro para enfocar la prospección de nuevos yacimientos, refiriéndose a las paleosuperficies de erosión insulares de las series carbonatadas o por debajo en las redes de cavidades de erosión y disolución, las cuales pertenecen a determinados intervalos estratigráficos donde existieron las condiciones necesarias para que se efectuase el mecanismo de relleno cársico. Por lo general, los yacimientos originados en el paleocarso se presentan siempre en rocas calcáreas y bajo superficies de discordancia angular o estratigráfica, y se desarrollan con mayor o menor intensidad de acuerdo a la actividad paleoclimática.

A continuación se detallan los yacimientos y manifestaciones asociados a los procesos cársicos en Cuba.

Bauxitas

Un ejemplo para este tipo, sería la manifestación San Francisco en el noreste de Pinar del Río, en el cual mediante pozos de perforación, se estableció, que los ocreos redepositados del área San Francisco yacen sobre paleosuperficies carsificadas de la Formación Artemisa.

Un yacimiento de bauxista paleocársico en Cuba es Sierra Azul, situado dentro de los límites de los mogotes Sierra Azul, Pan de Guajaibón y Sierra Chiquita en el noreste de Pinar del Río, a lo largo de cuyas bases se fijan claramente por una franja discontinua de 10-12 km de longitud de escombros de bloques gruesos bauxíticos.

El mogote Pan de Guajaibón, está compuesto por rocas carbonatadas de la Fm. Guajaibón de edad Albiano-Cenomaniano. Este mogote se refleja fuertemente en el relieve y se extiende en dirección latitudinal unos 7 kms con un ancho de 1,0-1,5 km y las cotas absolutas alcanzan los 700 m. Las partes cercanas a las cimas y la pendiente norte del mogote están desmembradas por depresiones tectónico-erosivas de forma irregular con límites sinuosos y lados abruptos. El yacimiento aparece sobre una superficie carsificada de calizas grises claras donde yacen las bauxitas pardo-rojizas litificadas, cubiertas por una secuencia terrígena de color rojo, compuesta por gravelitas, areniscas y aleurolitas. El horizonte bauxítico refleja por lo visto la interrupción en la sedimentación y las calizas junto con las bauxitas están comprimidas en pliegues complejos, a menudo invertidos, a veces braquifórmicos. Esto permite clasificar a dicho yacimiento sin lugar a dudas como paleocársico.

En Cuba además, existen grandes extensiones de calizas carsificadas cubiertas por los productos de la corteza de intemperismo, como ejemplo pueden citarse las regiones de San Miguel de los Baños, la zona sureste de la Sierra de Guamuaya, la región norte de la Sierra de Cubitas y otros.

Manganeso

La mecánica de formación de estas manifestaciones cársicas infiltracionales no es muy compleja y está en dependencia directa del ambiente geológico presente en su período de formación, o sea durante el neógenocuaternalio. En la parte central de Cuba las manifestaciones de manganeso del tipo cársico-infiltracional, están relacionadas con la corteza de intemperismo y las paleosuperficies que se desarrollaron en las rocas carbonatadas del cretácico superior-paleógeno inferior, en el intervalo neógeno-cuaternalio. Las manifestaciones primarias de manganeso se asocian a la Formación Santa Teresa del cretácico inferior.

Las condiciones de deposición del manganeso fueron favorables, ya que había una abundante fuente de mineralización manganífera en la Fm. Santa Teresa. Al norte de ésta existió durante el neógeno-cuaternalio un extenso lecho favorable para la acumulación de menas de manganeso en las superficies carsificadas de las rocas carbonatadas (paleosuperficies cársicas). Las dimensiones de las depresiones cársicas conocidas donde se explotaron las menas no eran muy grandes. Por ejemplo, La Mina Amaro se encuentra en una depresión en forma de uvala no muy grande, de dimensiones de 70 x 100 m.

Estas manifestaciones se pudieron originar en la cuenca por la presencia de aluminio, hierro, manganeso y compuestos fosfóricos pues sustituyeron y rellenaron las depresiones cársicas del relieve.

Arcillas

Las arcillas del tipo genético residual están asociadas a la corteza de intemperismo originadas por el proceso de carsificación-meteorización en formaciones carbonatadas y carbonato-margosas. Estas arcillas eluviales tienen una composición mineralógica general montmorillonítica-illítica, de alta plasticidad, y en ellas predomina el color pardorrojizo a abigarrado. Los depósitos adoptan forma de capas y lentes irregulares en potencia y distribución, o a

modo de bolsones reducidos. Esto está regido por la intensidad de los procesos hipergénicos y la capacidad de la roca de meteorizarse (carsificarse), lo cual a su vez depende de su composición mineralógica, agrietamiento, porosidad, estratificación o combinación de estos. Es común en los depósitos de arcilla hallar contenidos variables de perdigones de óxidos de hierro, sobre todo en su superficie y fragmentos de roca madre en la masa de los mismos, así como minerales de distintos tipos. El potencial útil oscila en pocos metros, y los mayores espesores se observan en la Fm. Villa Roja. Esta arcilla es utilizada en la industria de la cerámica y la del cemento, ejemplos: Rincón, Marbella I, Sabanilla, Rodas-Batey Nuevo, La Fortuna, San Agustín y otras. En el infrayacente de estos depósitos se encuentra la roca madre, la cual contacta con la arcilla de la superficie por una superficie cársica irregular.

Fosforita

Aparece en sedimentos eluviales originados sobre todo a partir de la destrucción de las secuencias carbonatadas de la Fm. Manacas. Los depósitos son del tipo silíceosarcillosos y presentan forma estratificada subhorizontal, con una potencia máxima mayor de 48 m, que se destacan en el relieve a modo de pequeños mogotes. Esta fosforita es secundaria del tipo colofanita, formada en la zona de carsificación de las calizas con contenidos variables de fluor-apatito. Se muestra como una masa mezclada deleznable y amorfa de material fosfático, arcillas y una porción variable de rocas silíceas de estructura irregular. En la masa se encuentran venillas de fosfato amarillo-carmelitoso o blanco-amarillento. El contenido de P_2O_5 en la masa oscila alrededor de 25 %, el contenido de hierro y aluminio también son elevados. El yacimiento más característico de este tipo es La Pimienta, cerca del poblado de Pons, en Pinar del Río.

Calcedonia y Ópalo

La acumulación de estas piedras semipreciosas está relacionada con los eluvios formados a partir de la meteorización de las ofiolitas. Si en un macizo laterizado ocurre el lavado de ocreos arcillosos, al circular a través de ellos las aguas meteóricas, pueden producirse oquedades, depresiones, sumideros y cavernas que en cierta manera se asemejan a sus homólogos en rocas carbonatadas. Estos fenómenos, denominados originariamente pseudocársicos han sido descritos en la Sierra de Moa en Cuba Oriental y se conocen también aunque menos espectaculares, los de Lomas de Galindo, Matanzas y de la Altiplanicie de Cajalbana, Pinar del Río. Los cueros de calcedonia crean vetas las cuales se encajan en las serpentinitas, con longitudes de varias decenas de metros, y una potencia de hasta 4 m. Se destacan del relieve general por su resistencia a la meteorización. Esta calcedonia es blanca (Cachalonga) constituidas por cuarcificación de las vetas de magnesita. La materia prima es pura con ocasionales restos de pseudomorfosis de concreciones o formas típicas arriñonadas de la magnesita. Asimismo pueden presentarse calcedonia blanco-azul, traslúcida, asociada a drusas de amastita y crisoprasa con potencias de 2-3 cm.

Los ópalos se producen por la alteración de las serpentinitas. La mineralización está asociada a la calcedonia relacionada a extensa áreas con variadas acumulaciones de vetas en serpentinitas rellenas por sílice amorfa y criptocristalina. Estos ópalos son de colores verdes, amarillos, naranjas y hasta negros jaspeados o moteados. La variedad verde es traslúcida. Las vetas muchas veces están agrietadas. Los ópalos también forman bloques y fragmentos de pequeño tamaño donde tienen poca transparencia hasta opacos y colores blancos hasta amarillentos y grisáceos, pero se asocian a coluvios en las laderas de los macizos de serpentinitas. Las acumulaciones más características para estos minerales son Loma Bayatabo, Loma García, Loma de los Ópalos y Loma

La Entrada entre otras. Se utilizan como piedras semi-preciosas en joyería y artesanía.

Turba

Aunque no pertenecen a los depósitos formados directamente por los procesos de carsificación, la roca encajante a los mismos, son calizas organógenas carsificadas, que se clasifican como “carso sumergido” (Ciénaga de Zapata, Laguna de La Leche, Ciénaga de Lanier, extremo oriental de Guanahacabibes). Son depósitos no consolidados, desarrollados en ambientes lagunares y costeros, tienen variada textura con un gran desarrollo territorial y una potencia general de 10-12 m, lo que facilita su extracción industrial. Comúnmente éstos se mezclan con arcillas turbáceas, limos, sapropel, arenas y otros. Tierra adentro transicionan de sedimentos palustres paráliticos a continentales terrígenos o carbonatados. La turba se utiliza en muchos países en la fabricación de briquetas para el empleo como combustible domestico.

Guano

En muchas cavernas y cavidades subterráneas se encuentran grandes acumulaciones de guano de murciélagos, las cuales se pueden extraer para su utilización como fertilizantes u obtener el nitrógeno, como hicieron los mambises en las pasadas guerras independentistas.

SUELOS DE LAS REGIONES CÁRSICAS DE CUBA

La mayoría de las regiones cársicas poseen poco o ningún desarrollo de suelos agrícolas. Las más de las veces, estas regiones se caracterizan por la presencia del llamado “carso desnudo” y en otras ocasiones, sólo poseen el denominado “carso cubierto por una delgada capa de suelos” la que se limita a suelos del grupo de los Leptosoles (subgrupo Líticos), de acuerdo con la clasificación utilizada por la FAO-UNESCO. No obstante, el carso tropical de gran parte de nuestro país, y de otras regiones en latitudes tórridas, suele presentar potentes capas de suelos con buen desarrollo y evolución para el uso agrícola, como sucede por ejemplo, en la Llanura Cársica Habana-Matanzas, donde se observan suelos Ferralíticos y Ferrálicos Rojos muy profundos, ocasionalmente con espesores que superan los 10 m, antes de alcanzar la roca caliza subyacente.

Lo anterior obedece a condiciones particulares de la formación y desarrollo del carso tropical en Cuba, del cual una parte significativa se ha originado en relieves llanos y hasta muy llanos o pediplanos cársicos, lo que ha coadyuvado a la ausencia o niveles muy bajos de erosión, y al desarrollo de potentes suelos y cortezas de intemperismo. En cambio, no sucede lo mismo en los territorios cársicos originados en condiciones de relieves más enérgicos, como son los tipos de carsos de alturas y montañas de todo el país, donde la formación de suelos es mucho más pobre como consecuencia a su vez de niveles altos de erosión, y a la cual se le suma otro factor principal, la denudación cársica.

La existencia del carso en algo más de 65 % del territorio nacional, ha sido un elemento esencial en el desarrollo de los suelos, con un marcado predominio del calcio en el Complejo de Intercambio Catiónico (CCC); factor que favorece la formación de coloides orgánicos, la saturación de dichos suelos por bases alcalinotérreas, y en definitiva la fertilidad de los mismos. Puede decirse, que los suelos más fértiles y productivos de Cuba, se encuentran distribuidos en regiones cársicas.

Ellos son en primer lugar del tipo ferralíticos rojos (con los subtipos: típico y compactado) formados sobre calizas cavernosas, fundamentalmente de la Formación Güines, los que ocupan un área aproximada de 8475,2 km², y están distribuidos sobre todo, el carso parcialmente cubierto del sur de la Habana-Matanzas, en las llanuras carsi-

ficadas de Ciego de Ávila, y en parte del municipio de Gran Tierra, Maisí, Guantánamo.

Se trata de suelos profundos y hasta muy profundos, de perfil completo (ABC), con excelente estructura para el laboreo agrícola, de textura franco arcillosa saturados por Ca²⁺ pero en contraste, son suelos muy descarboxinados (no reaccionan al HCl), con pH ligeramente ácido lo que contribuye a la redisolución de las calizas subyacentes, y al desarrollo y evolución de formas cársicas subterráneas.

El contenido de materia orgánica de estos suelos oscila entre 3 y 5 %, lo que favorece el desarrollo de los cultivos agrícolas y otras plantas. Dichos suelos aportan por sufusión o succión, una significativa cantidad de esta materia orgánica a las cuevas y otras pequeñas cavidades cársicas que en ocasiones subyacen a ellos, lo que representa una transferencia neta de nutrientes hacia el carso subterráneo, y se emplea como fuente de alimentación muchos de los organismos y microorganismos que en él habitan. En la tabla se pueden apreciar los contenidos medios de nutrientes, de un suelo ferralítico rojo típico de la Llanura Cársica Meridional de La Habana, según datos del Instituto de Suelos.

Tabla 6. Análisis Químico de un suelo ferralítico rojo típico (Perfil Típico).

Prof. (cm)	M.O %	N %	pH		K₂O %	P₂O₅ %	P (aprov) PPM	Bases de Cambio me/100 g				CCC Cmol + Kg⁻¹ (arc)
			H₂O	KCl				Ca²⁺	Mg²⁺	K⁺	Na⁺	
0-20	3,67	0,200	6,65	5,50	0,33	0,30	2,52	12,88	2,40	0,09	0,15	24,87
30-45	1,78	0,100	7,05	5,75	0,24	0,22	2,50	9,60	1,52	0,04	0,17	20,1
60-75	0,62	0,027	7,00	5,87	0,22	0,15	0,35	8,27	1,23	0,04	0,21	18,60
> 90	0,48	0,027	6,98	5,87	0,23	-	3,50	7,95	1,02	0,04	0,27	-

Algunos geólogos opinan que los mismos se formaron a partir de depósitos marinos del período pleistoceno, ricos en hierro, lo cual es también dudoso, dada la ausencia absoluta de fauna fósil de esas supuestas facies marinas en dichos depósitos. Por otro lado, existen nuevas pruebas de que en la actualidad se están formando suelos rojos *in situ*, derivados de calizas mesozoicas, a más de 200 m de altitud, en las dolinas y poljes cársicos de la Sierra de los Órganos, Pinar del Río. En todo caso, estas depresiones cársicas nunca fueron alcanzadas por el mar durante las transgresiones del cuaternario. Es posible que los suelos ferralíticos rojos y los eluvios de calizas sobre los cuales se han formado, sean una consecuencia de los intensos períodos lluviosos que debieron caracterizar a las fases más húmedas durante las oscilaciones climáticas antiguas del período pleistoceno. Su desarrollo y evolución pedológica en condiciones de un relieve muy plano y estable, sin erosión, pudieron haber permitido la acumulación partícula a partícula, durante cientos de miles de años, de los pocos residuos arcillosos insolubles que posee la roca caliza.

Suelos muy parecidos y vinculados al carso en las regiones de llanuras carsificadas de toda Cuba, son los ferrálicos rojos, un intergrado evolutivo con los verdaderos suelos ferralíticos rojos derivados de calizas, dado que los ferrálicos se han formado a partir de un proceso de ferralitización incompleta. Los mismos están, no obstante, en paragénesis con los verdaderos ferralíticos, con los que forman a veces combinaciones en las regiones cársicas ya mencionadas, con características agroproductivas muy parecidas. Sin embargo, el pH de estos suelos Ferrálicos Rojos es algo mayor que el de los verdaderos Ferralíticos, por lo que su papel en el proceso de redisolución de las calizas subyacentes y su influencia en el desarrollo del carso, es comparativamente inferior que en aquellos.

Otro grupo de suelos asociados al carso, son los del agrupamiento húmico sialíticos y, en particular, los del tipo rendzinas rojas (alrededor de 4233 km²). En éstos, el proceso de humificación está favorecido por la presencia de elevadas cantidades de CaCO₃ residual en el perfil, lo cual facilita la condensación de los ácidos húmicos. Son también suelos fértiles aunque poco productivos en ocasiones, pero generalmente poseen elevadas reservas

de materia orgánica, por lo que, al igual que en los ferralíticos rojos, juegan también un importante papel en la transferencia de nutrientes solubles, hacia el carso subterráneo.

También resultan suelos importantes los del agrupamiento poco evolucionados, con predominio de las protorrendzinas rojas de perfil incompleto O-A-D ó A-D (575 km²), ubicados en las áreas muy jóvenes del carso costero (carso desnudo y semidesnudo), y los lithosoles del subtipo eutrico, formados por la acumulación bruta de humus en pequeñas áreas sobre los mogotes de calizas (aproximadamente 163,12 km²). En ambos casos se trata de suelos muy poco productivos desde el punto de vista agrícola, debido a la presencia de factores limitantes intensos, por lo que los mismos poseen una mayor vocación para las actividades de tipo forestal-silvicultural y como soporte ecológico. A pesar de su poco desarrollo y evolución, estos suelos constituyen valiosas fuentes de aporte de materia orgánica para las formas de vida del carso subterráneo.

Determinadas áreas no cársicas en superficie, presentan en cambio un carso enterrado en profundidad debajo de formaciones geológicas no solubles (no carsificables); tal es el caso de toda la llanura sur y suroeste de Pinar del Río. En particular, la Llanura de Guane-Mantua al suroeste de esa provincia, está caracterizada por la presencia de

dolinas y lagunas cársico-sufosivas, allí donde de manera puntual, el carso ente-

rrado queda al descubierto como consecuencia de los procesos cársico-sufosivos. Se trata de suelos cuarcíticos ácidos tales como: los alíticos rojos, alíticos rojo amarillentos y alíticos amarillos (cerca de 1687 km²) todos clasificados antiguamente como suelos ferralíticos cuarcíticos.

Se observa también una notable presencia de suelos ferralíticos amarillentos lixiviados, así como suelos poco evolucionados (arenosoles del género cuarcítico con unos 1030 km²) y en menor grado, fluvisoles (unos 374 km²) con predominio en el área de los subtipos Típico, diferenciado, gléyico, y arénico, también del género cuarcítico.

Estos suelos poseen pocas o a lo sumo medianas aptitudes para la actividad agrícola (con excepción de algunos cultivos específicos, como tabaco), debido a sus bajos niveles de pH en agua y en KCL, muy baja CCC, escaso contenido de materia orgánica y nutrientes para las plantas, y en el caso de los alíticos además, los elevados tenores de aluminio intercambiable (más de 50 % del complejo de intercambio) el cual resulta tóxico para muchos cultivos. De manera coincidente, estos tipos y subtipos de suelos pueden encontrarse en el fondo de los grandes valles y poljes fluvio-cársicos del carso cónico de la Sierra de los Órganos, donde se combinan con ferralíticos rojos y fersialíticos pardo rojizos.



Fig. 20. Muestra de suelos alítico rojo en la Sierra de los Órganos, Pinar del Río.

Un área importante con carso cubierto en Cuba, la constituye sin dudas el carso desarrollado debajo de depósitos palustres y lacuno-palustres. Este es el llamado carso cubierto por pantanos y ciénagas, como sucede en gran parte de la Ciénaga de Zapata, en la Ciénaga de Lanier, en la Ciénaga del Majaguillar, Ciénaga de Yaguajay, las ciénagas al norte y sur de Camagüey, la Ciénaga Sur de La Habana, el Golfo de Ana María, y otras pequeñas áreas en la depresión Guane-Cortés y en las ciénagas interiores y costeras de Guanahacabibes (6694,75 km²). Sobre estos depósitos palustres y lacuno-palustres (sapropelitas, margas, etc.) suele originarse potentes depósitos de turba de gran espesor, con diferentes grados de evolución pedológica (suelos Hísticos o Histosoles, con los tipos fíbrico, méxico, y sáprico, de acuerdo con la Nueva Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. Estos suelos, poseen gran significación como substrato ecológico en los frágiles ecosistemas de ciénaga, además de constituir en muchos casos un excelente fertilizante para la agricultura orgánica. Se podrá comprender la estrecha relación que existe entre el desarrollo del carso y una parte notable de los suelos agrícolas de nuestro país, de lo que se deduce a su vez la trascendencia de proteger ambos recursos naturales: los suelos y a su vez, la protección de las formas cársicas como dolinas, sumideros, cuevas, etc. Resulta perniciosa la práctica del relleno de dolinas y microdepresiones, con suelos removidos de su entorno. Esta práctica, lejos de beneficiar a la agricultura bajo la errónea concepción de aumentar el área agrícola, realmente la perjudica por dos razones fundamentales:

- Incremento en la probabilidad de inundaciones en las tierras agrícolas al obstruirse artificialmente los conductos de desagüe natural de los territorios cársicos.
- Inducción o aceleración de los procesos sufosivos como respuesta natural de la actividad del carso, después de haber sido obstruidas las dolinas y microdepresiones del relieve por parte del hombre.

Los suelos tienen una función principal en el aporte y transferencia de materia orgánica y energía hacia el medio ambiente subterráneo. Algunos organismos que viven en la oscuridad de las cavernas (como los grillos de cuevas y los peces ciegos), han tenido que utilizar para su supervivencia, las arcillas y sustancias orgánicas “lavadas” desde los suelos suprayacentes, como fuentes alternativas de alimentación, ante la carencia de organismos productores en el medio ambiente subterráneo. También el aporte significativo de los detritos vegetales (hojas, ramas, y hasta troncos de árboles enteros) que son eventualmente arrastrados por las corrientes subterráneas, constituyen sin dudas fuentes de materia orgánica y energía para los organismos cavernícolas.

Pero en las espeluncas que durante muchos años han sido hogar de importantes poblaciones de murciélagos, ha venido a sumarse a los suelos y otras fuentes de energía, otra significativamente superior en cuanto a reservas de materia orgánica y nutrientes, que es el llamado guano (excreta) de estos mamíferos voladores. Como norma, en el guano fresco de murciélagos (también llamado murcielaguina), formado por una mezcla de las excretas de murciélagos con cadáveres de éstos y otros organismos, se han encontrado contenidos medios de nitrógeno de más de 3,0 %, potasio (K₂O) de 1,27 % y fósforo total (P₂O₅) de alrededor de 4,9 %.

Como se aprecia, en todos los casos los niveles de materia orgánica y P₂O₅ son muy altos, lo cual es una característica de los guanos más antiguos, que han perdido por disolución el potasio y gran parte del nitrógeno

Tabla 7. Caracterización en por cientos de diferentes muestras de guano en cuevas cubanas.

No. muestra	Materia Orgánica	Nitrógeno	Calcio	Magnesio	Fósforo	P ₂ O ₅	Clasificación
1	6,74	0	2,16	0,71	1,13	2,58	Guano
2	7,23	0,015	3,56	3,24	2,26	5,17	Guano
3	7,45	0	3,16	3,33	5,34	12,68	Guano Fósil
4	16,95	0	3,95	1,02	3,26	7,46	Guano Fósil
5	9,76	0,01	3,32	3,34	1,6	3,66	Guano

que tenían cuando frescos, en tanto han sufrido un proceso de enriquecimiento milenario en fósforo. Este guano antiguo y más aún, el guano fósil que en ocasiones suele encontrarse enterrado bajo el piso secundario de algunas cavernas de Cuba, puede considerarse como una especie de superfosfato natural muy rico como fertilizante fosfórico para la agricultura, y como fuente de este nutriente para hongos, bacterias, y otros microorganismos que pululan en el subsuelo cubano.

DEGRADACIÓN DEL MEDIO SUBTERRÁNEO

Para evaluar la degradación del medio subterráneo es necesario considerar, en primer lugar, el nivel energético de las cavernas. Estos se definen, de acuerdo con Heaton (1986) del modo siguiente:

- Alto.** Aquellas que reciben, periódicamente, aportes del medio exterior, sobre todo en la forma de crecidas fluviales.
- Medio.** Las que reciben parte de pequeños cursos de agua, viento y animales.
- Baja.** Dependen solo de los flujos internos de energía.

Un aspecto importante es la capacidad de resiliencia o capacidad receptiva de la caverna, definida como el máximo número de visitantes aceptable en cierta unidad de tiempo y condiciones definidas, que no implican la modificación permanente de un parámetro relevante. Esta definición, aunque en principio aplicada a cuevas turísticas es, en general, aplicable a cualquier cueva.

El ecosistema subterráneo se caracteriza por la ausencia de luz en su mayor parte, el silencio casi completo y las particulares propiedades del aire cavernario. Presenta dos niveles interactuantes: el físico y el biológico. En el nivel físico se encuentran el microclima, los flujos de masa, el sustrato. En el nivel biológico se encuentra la peculiar flora y fauna subterráneas. Por ello, los factores de degradación son aquellos que alteran, de modo permanente, el equilibrio entre ambos niveles.

La degradación del medio subterráneo se expresa de tres formas principales:

- Perturbación estética, que podrá ser permanente o no.
- Deterioro y destrucción de las espeleotemas, daño permanente y, siempre, irreversible.
- Contaminación química o biológica del agua y, en menor grado, del aire.
- Daños al patrimonio paleontológico.
- Daños al patrimonio arqueológico.

La exploración espeleológica requiere de iluminación, de manera que es un elemento de degradación del medio abandonar el carburo y las baterías usadas. En este último caso, se ha comprobado que,

- Una batería de zinc contamina de 5 a 30 m³ de agua.
- Una pila de cadmio, de 3000 a 15 000 m³ de agua.
- Una de mercurio de 15 000 a 30 000 m³ de agua.

Otro elemento es el material biodegradable, tanto orgánico como inorgánico. En el primero se encuentran los excrementos, residuos alimenticios, la picadura de cigarrillos y, en el segundo, los envases de carne y equipos abandonados. También existe material orgánico no biodegradable, como los bidones y botellas plásticas, bolsas y jabas, nylon, etcétera.

Existen efectos debidos a la iluminación y al paso de los turistas en cuevas adaptadas o usadas con fines turísticos. Los efectos de la iluminación artificial son varios, y se manifiestan en el incremento de la temperatura del

aire y la roca en su área de influencia, la disminución de la humedad relativa, y la presencia de microorganismos. Tómese en consideración que la iluminación en los períodos de actividad turística constituye una fuente de energía totalmente independiente del nivel energético de la cavidad. La visita de los turistas implica el ingreso a un medio estable, frágil y vulnerable, de un número importante de personas durante un cierto intervalo de tiempo. Esta intervención implica el riesgo de contaminación térmica, química y biológica. En cuanto al aspecto térmico, se explica por la presencia de visitantes que disipan más o menos calor en virtud de las características climáticas (temperatura, humedad relativa) del sector de la cueva y de la velocidad de desplazamiento del visitante. La contaminación química está asociada, sobre todo a la liberación de dióxido de carbono y su incorporación a la atmósfera de la cueva, que puede dañar las pinturas rupestres o las formaciones secundarias, como ha ocurrido en las Cuevas de Altamira o Lascaux, donde la visita de turistas ha sido prohibida por completo.

USO SOSTENIBLE DE LAS FORMAS CÁRSICAS

Los estudios realizados hasta la fecha para dar luz al asiento histórico del empleo de las formas cársicas por el hombre, demuestran las profundas raíces nacionales e internacionales sobre las que se sustenta. Las evidencias analizadas para los diferentes períodos históricos en Cuba y en el mundo permiten clasificar patrones de manejo civil y militar de dichas estructuras del relieve. Los patrones definidos de manejo de las formas cársicas y obras artificiales están estrechamente coligados a los términos abrigo o refugio, por lo que necesariamente no se puede desvincular su uso del aprovechamiento y adaptación de la superficie excavada de forma natural por los procesos cársicos que se producen en las rocas carbonatadas, aunque el hábitat troglodita, presente en el establecimiento de dichos patrones, esta linealmente relacionado también a las excavaciones artificiales en éstas u otros tipos de rocas. Los patrones defensivo y económico-social de provecho de las estructuras cársicas estarán influidos por variables y factores de carácter histórico, en ocasiones coyuntural, ejemplo de ello es la doctrina militar adoptada, el método de combatir, la forma de conducir la guerra, el tiempo de estancia de las tropas en determinadas regiones y otros de comportamiento más estable, como el clima, el predominio del paisaje cársico sobre diferentes tipos y el estadio cultural, entre otros.

Tabla 8. Uso social de las cavernas.

Factores Patrones	Rel	Doct M	Clima	Superv	Hab	Met C	Est C	Pred P
Defensivo		X				X	X	X
Económico - Social	X		X	X	X		X	X

- Rel:** Religioso, funerario.
- Doct M:** Influencia de la doctrina militar adoptada.
- Clima:** Factores climáticos.
- Superv:** Aprovechamiento de los recursos naturales de las regiones cársicas para alimentación y abastecimiento de agua.
- Hab:** Habitacional, temporal o permanente, en ocasiones asociado al religioso funerario.
- Met C:** Método de combatir (irregular o regular).
- Est C:** Estadio o desarrollo cultural alcanzado.
- Pred P:** Predominio del paisaje cársico (montañoso o llano).

Patrón combinado

El uso de las cavidades cársicas en Cuba queda identificado por el comportamiento de los grupos culturales aborígenes menos desarrollados, con el predominio del patrón económico-social bajo el influjo de los factores climáticos, religiosos (funerarios), de supervivencia y habitacional temporal o permanente, que toman del entorno, el soporte más elemental para sobrevivir.

Aborígenes de Cuba

Durante el período colonial temprano constan evidencias de la evolución hacia el *patrón defensivo*, propio del uso circunstancial que debieron hacer de las formas cársicas los exponentes históricos de rebeldía aborígen. Según consta en las crónicas de la época, a pesar del corto período de acciones bélicas de los hombres que junto al cacique dominicano Hatuey ofrecieron resistencia a la conquista (tres meses aproximadamente), de la enorme desventaja técnica y del nulo conocimiento del arte militar de la época, se intuye el empleo de las cuevas con fines diversos, como escondrijos de alimentos y refugios para las personas. El escenario escogido por el rebelde Guamá para su heroica resistencia, impresionante además por el tiempo de duración de la lucha (más de 9 años), establece la figura del *patrón defensivo* con el dominio de casi todos los factores mencionados. La superioridad del paisaje cársico sobre otros tipos presentes permite especular, dada la poca información disponible al respecto, que el uso de las formas cársicas tuvieron una influencia directa en la lucha contra los españoles.

Cimarrones

Particularmente el cimarrón abandona la solapa, cueva o gruta o se defiende desde ella para desarrollar sus tácticas de *resistencia pasiva y activa*, relacionadas al diferendo clasista rancheador-cimarrón, a la persecución, la búsqueda de alimentos directamente en la naturaleza o al despojo en los poblados aledaños a la región de actuación. De los cimarrones se puede trasladar y adaptar a las condiciones actuales los siguientes casos de empleo de las formas y regiones cársicas:

Patrón defensivo (empleo de tácticas de resistencia pasiva) o combinado por la presencia de factores económico sociales en la organización interna de la supervivencia y la infraestructura elemental en las condiciones de los palenques. La existencia de palenques en el interior de cuevas por largos períodos demuestran la capacidad de adaptación del hombre a las condiciones del hábitat rupestre (troglodita), valiéndose de forma óptima para la supervivencia, de los recursos propios del entorno cársico. Se denotan factores como el predominio de este paisaje en regiones montañosas del occidente, opción habitacional más segura al aprovechar la superficie excavada en el macizo rocoso, los depósitos de *aguas autóctonas* para el consumo humano y animal, la fertilidad de los hoyos y valles cársicos para la agricultura, el conocimiento de los secretos de las plantas medicinales y comestibles y la caza sistematizada de animales, lo que demostró un inestimable, pero instintivo manejo del carso y su entorno, quizás porque la carga (por el número y la actividad aislada de éstos) al medio ambiente no era favorable para un impacto negativo.

La resistencia pasiva contempla como elementos tácticos fundamentales, la selección de los sitios de estancia prolongada en zonas prácticamente inaccesibles, los puestos de observación y aviso en posiciones avanzadas, en cuevas y solapas alejadas del *palenque subterráneo*, el amplio uso (juicioso o no) del enmascaramiento natural, la obstaculización con trampas rústicas de los accesos más importantes y el principio de evitar el encuentro frontal con los rancheadores.

Patrón defensivo (empleo de la táctica de resistencia activa) que incluye necesariamente todos los factores anteriores, pero determinado por el carácter nómada, el constante movimiento en composición de cuadrillas, parejas o individuos solos. Evitaban, por lo general, el encuentro con los rancheadores, pero en ocasiones emboscaban con armas rústicas, y se concentraban en dar muerte primero a los perros rastreadores. Almacenaban alimentos en escondrijos (cuevas y solapas), se refugiaban donde la noche los sorprendiera, atacaban las plantaciones para robar alimentos, objetos, utensilios y a veces en busca de otros esclavos y esclavas, estas últimas como regla, por la fuerza. El empleo de las formas cársicas *por los independentistas* está influido por ambos patrones (defensivo y económico social), mediados por los factores y características que se detallan a continuación.

Guerras por la Independencia

Los campamentos situados en formas cársicas responden a la estabilidad de los caudillos en determinadas regiones de operaciones y a las condiciones de las prefecturas en territorios de difícil acceso. En algunos casos se emplearon como campamentos, hospitales de campaña, talleres, armerías y almacenes de todo tipo y un caso distinguido como abrigo a la imprenta que reprodujo en campaña el periódico *El Cubano Libre*. Las tácticas de guerra puestas en práctica por los insurrectos, le imprimen un carácter seminómada a su vida diaria, en este caso las formas cársicas tuvieron un empleo circunstancial, como los campamentos temporales y escondrijos de armas, municiones y otros pertrechos de guerra.

Otros empleos importantes en esta etapa, están relacionados a la labor conspirativa, a modo de lugares ocultos y seguros de reunión en zonas cercanas a las ciudades. El Ejército Libertador utilizó las regiones cársicas montañosas para la ubicación de campamentos, y en algunos casos como escenario de combate, aprovechando las características de difícil accesibilidad para la artillería española. En el ámbito nacional resta concluir la *última etapa insurreccional*, que se caracteriza por el predominio del patrón defensivo. Se considera su empleo en esta etapa como meramente circunstancial, con excepciones de algunos talleres, escondrijos y refugios. El escenario principal del desarrollo de esta lucha, la Sierra Maestra, no permitió un progreso de la táctica del empleo de las formas cársicas al no predominar este tipo de paisaje. No obstante, el núcleo guerrillero de la Sierra de los Órganos es un ejemplo de utilización de éstas, que aporta un nuevo componente a la táctica de empleo de las formas cársicas, al aprovecharlas como vías para la maniobra de pequeñas unidades. Asimismo, las fuerzas rebeldes organizadas en Camagüey contaron con las cuevas existentes en la región durante el paso de las columnas invasoras y en la labor conspirativa.

De la *experiencia mundial*, se concluye en apretada síntesis que, para muchos casos, se manifiesta una evolución desde los factores climáticos y patrones económico-sociales, hacia el defensivo, así como la fusión de ambos, sobre todo hasta el período en que los ejemplos históricos estudiados se muestran con mayor elocuencia en la construcción y adaptación subterráneas con fines defensivos. Tal es el caso de los castillos troglodíticos, los subterráneos romanos, catacumbas, las ciudades subterráneas y con mayor fuerza todavía, las obras defensivas directamente en el carso, desde la Primera Guerra Mundial, hasta la actualidad.

Los ejemplos internacionales se pueden clasificar como sigue:

- Combinación de las grandes bóvedas cársicas con obras ingenieras defensivas monumentales (castillos, fuertes), donde el acceso a las edificaciones se dificulta por la verticalidad y altura de los farallones, se crean posiciones de combate con los medios de la época medieval.
- Utilización de las grandes ciudades subterráneas como protección, para evitar el contacto directo con adversarios más poderosos. Se desarrollan soluciones ingenieras defensivas, incorporadas a la excavación de túneles y otras relacionadas a la supervivencia ante largas permanencias en el hábitat troglodita. De gran importancia y que requieren un acercamiento particular son las grandes obras hidráulicas europeas relacionadas al carso.
- Adaptación de las cavidades naturales para la guerra regular, como refugios antiaéreos, posiciones de fuego de la artillería, campamentos de tropas, hospitales de campaña, puestos de mando, almacenes, talleres de todo tipo, fábricas de técnica de combate, armamento y para la investigación militar.
- Empleo en el desarrollo de la lucha irregular, como base de operaciones, campamentos permanentes, puestos de observación, talleres y almacenes de todo tipo, hospitales de campaña, vías para la maniobra, escondrijos, puntos de reunión, regiones de espera

para la realización de emboscadas y otras acciones en la retaguardia del adversario.

- Refugios antiaéreos para la población civil. También se utilizaban las grandes obras subterráneas urbanas, como las galerías de trenes subterráneos (metro). Alcantarillados, catacumbas y restos de edificaciones pretéritas se emplearon en la lucha irregular en áreas urbanas o cercanas a las ciudades.

Experiencias actuales de países desarrollados en escenarios tradicionalmente conflictivos, donde se han construido grandes obras ingenieras en cavidades naturales, para la protección del personal civil y militar, compatibilizadas desde tiempo de paz con destinos civiles de carácter social, económico, deportivo y cultural-recreativo.

EFFECTOS DEL USO DEL CARSO Y LAS CUEVAS SOBRE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

Los efectos más notables del deterioro ambiental de las aguas superficiales y subterráneas se expresan como afectaciones a la calidad de las aguas y al régimen hídrico. Éstas son producidas por la contaminación. Los contaminantes son sustancias que se introducen en el agua esencialmente como consecuencia de la actividad humana. El *agua contaminada* es aquella cuya composición física, química o bacteriológica constituye o puede constituir un peligro para la salud humana, el ecosistema o ambos.

En el medio cársico las sustancias contaminantes penetran de dos maneras:

- Una vía rápida, concentrada, a través de las corrientes superficiales que penetran en las cuevas y se convierten en ríos subterráneos y, también, por el escurrimiento difuso que se concentra al llegar a las simas y sumideros y penetra, así, en el subsuelo.
- Una vía lenta, difusa, a través de los campos de lapies, colinas o se filtra a través de la cobertura sedimentaria, los suelos o, incluso, a través de las rocas que afloran desnudas.

Las *fuentes de contaminación* más importantes son domésticas, industriales (incluyendo la minería) y agrícolas, pero en las cuevas, la exploración espeleológica y el turismo subterráneo son también fuentes de degradación del medio ambiente subterráneo y, generalmente, de las aguas cársicas. Los *focos de contaminación*, es decir, aquellas instalaciones o actividades específicas que causan una pérdida de calidad de las aguas que afectan ne-



Fig. 21. Procedencia exterior de aguas en un sistema cavernario que pueden ser un contaminante.

Tabla 9. Fuentes y focos de contaminantes (Amenazas: X, baja; XX, media, XXX, alta).

Actividad		Demanda de oxígeno	Nitrógeno y fosfatos	Cloruros	Metales pesados	Orgánicos e hidrocarburos	Bacterias y virus
Desechos domésticos y municipales	Tanques sépticos	XXX	XX				XXX
	Letrinas	XXX	XX				XXX
	Alcantarillado	XX	X				X
	Rellenos sanitarios	XXX	X	X	XX	XX	XX
Agricultura	Insecticidas y herbicidas					XXX	
	Fertilizantes		XXX				
Construcción y minería	Campos de petróleo			XXX		XX	
	Escombreras				XX		
	Escurrimiento de áreas de parqueo			XXX	X	X	
Actividades industriales	Almacenamiento y distribución de gasolina					XXX	
	Desechos industriales			X	XXX	XXX	
	Productos químicos			X	XXX	XXX	

gativamente a los ecosistemas cársicos son los rellenos sanitarios, las vaquerías, centros porcinos, gasolineras, refinerías y centros colectores de petróleo, ciertas industrias agresivas, como la azucarera, la minería en general, las procesadoras de papel y fertilizantes, entre otras.

En las regiones cársicas habitadas es común, lamentablemente, utilizar cuevas, simas, sumideros y dolinas, como vertederos de desechos sólidos y líquidos. En parte, ello se debe a que suelen “desaparecer” bajo tierra y se supone que dejan de constituir una amenaza para la salud o el ecosistema o, incluso, que eliminan el impacto visual negativo. Los acuíferos cársicos, sin embargo, son muy efectivos en la transmisión de contaminantes. Esta capacidad es muy superior a la que poseen de autodepuración o atenuación. Uno de los mayores peligros de esta práctica está en el, muchas veces elevado tiempo de residencia de las aguas en los macizos cársicos, motivado por la tortuosidad de los conductos y canales subterráneos que pueden demorar la contaminación de acuíferos o manantiales por decenas de años. Ello a contribuido a magnificar de manera exagerada la capacidad autodepuradora del carso, la cual es relativamente inefectiva por las causas siguientes:

- Superficie específica disponible para la colonización de los microorganismos naturales, así como para la adsorción y el intercambio iónico, mucho menor en las rocas carsificadas que en los sedimentos clásticos porosos.
- Rápida infiltración en los terrenos cársicos que reduce la oportunidad de evaporación, un mecanismo fundamental en la eliminación de compuestos orgánicos volátiles, como ciertos solventes y muchos pesticidas.
- Filtración física relativamente inefectiva en los delgados suelos del carso y a través de las rocas cavernosas, por lo que los sedimentos y los microorganismos se transmiten con rapidez hacia las aguas subterráneas.
- Transmisión de materia particulada directa a través del sistema cársico, ayudada por el régimen turbulento asociado a las corrientes fluviales subterráneas.
- Mecanismos de eliminación dependientes del tiempo, esenciales para reducir las bacterias y los virus, que tienen una efectividad muy limitada debido a la alta velocidad del flujo en conductos y al reducido retardo que producen los procesos de adsorción-desorción.

El régimen hídrico suele afectarse por la acción del hombre sobre el sistema cársico. Esto se manifiesta como se relaciona a continuación:

- Incremento o decrecimiento, e incluso agotamiento, del caudal de los ríos y manantiales.

- Retardo o aceleración de los picos de avenidas de los ríos y la frecuencia de inundaciones en áreas cársicas, así como el retardo o la aceleración de las variaciones de niveles de agua subterránea en los acuíferos.
- Descenso sostenido del nivel de las aguas subterráneas o su incremento indeseado.
- Variaciones en la dirección de flujo subterráneo.
- Cambios en la distribución de las zonas de recarga y descarga de las aguas subterráneas.

Las acciones que provocan tales efectos son variadas. Pueden citarse ejemplos dramáticos de éstos debido a una gestión inadecuada de las áreas cársicas. La construcción de obras hidráulicas, carreteras y edificios, sobreexplotación de acuíferos, deforestación, explotación minera son actividades que deficientemente sustentadas en el conocimiento del sistema cársico provocan resultados nefastos para la economía y los ecosistemas cársicos.

EXPLORACIÓN Y DOCUMENTACIÓN ESPELEOLÓGICA: HACIA UNA ESPELEOLOGÍA SOSTENIBLE

No todas las cuevas constituyen pasajes o galerías fácilmente transitables. La mayoría, alternan secciones de cómodo movimiento, por las que se puede transitar, caminar tranquilamente, con galerías estrechas, cañones, puentes, ríos subterráneos, abismos, cascadas, lagos que, en definitiva, convierten la exploración espeleológica en una actividad riesgosa si no se está bien preparado física e intelectualmente para ello. La mayor parte de los accidentes que ocurren durante la exploración espeleológica se deben a las llamadas *cuatro faltas*:

- Falta de entrenamiento.
- Falta de equipamiento.
- Falta de preparación.
- Falta de sentido común.

Existe un grupo de reglas inviolables para la exploración espeleológica sostenible, ya sea para una caverna conocida o una nueva. Su cumplimiento permite conservar el carso, las cuevas y, sobre todo, minimizar el riesgo de los visitantes. Tales reglas se conocen como el Código de Mínimo Impacto (CMI).

Mínimo Impacto de la Exploración Espeleológica (CMI)

Prácticamente todas las agrupaciones espeleológicas del mundo han adoptado estos principios, destinados a lograr una Espeleología sostenible, que permita explorar,

disfrutar y estudiar el mundo subterráneo causando el menor daño posible al entorno y a los visitantes. Este Código es el siguiente:

1. Toda visita a una cueva causa un impacto. ¿es necesario ese viaje a esa cueva?. Si se trata de una excursión recreativa debe preguntarse si no puede visitarse otra menos vulnerable. Esta evaluación se debe hacer en dependencia del propósito de la visita, la composición y experiencia del grupo de exploradores y si el viaje probablemente dañe la cueva.
2. Siempre que sea posible, los jefes del equipo deberán visitar previamente la cueva y conocer los sitios más vulnerables, identificar los lugares de acampada y reducir la necesidad de exploraciones innecesarias.
3. Explore despacio. Podrá ver y disfrutar mejor y habrá menos oportunidad de dañar la cueva y al grupo. Esto es esencial cuando se está cansado y en retirada de la cueva.
4. Si hay principiantes en el equipo, asegúrese que estén cerca de un espeleólogo con experiencia que pueda auxiliarlos cuando sea necesario. La velocidad de marcha es la del miembro más lento del grupo.
5. Explore en grupos pequeños. Cuatro es un número excelente, porque permite andar en pareja y, en caso de accidente, dos siempre pueden salir adelante en busca de ayuda.
6. Explore en equipo. La espeleología es una actividad de equipo que tiene lugar entre personas que se ayudan mutuamente todo el tiempo. No se separe a menos que ello reduzca el impacto sobre la cueva.
7. Constantemente esté al tanto de su posición en el grupo y la de sus compañeros. Alértelos antes de que provoquen algún daño o realicen una acción peligrosa.
8. Trasládese con mochilas y bultos tan pequeños como sea posible y trate de no utilizarlo en cuevas muy vulnerables o sensibles, o en ramificaciones de las galerías principales.
9. Asegúrese que los miembros del equipo no deambulan innecesariamente por la cueva.
10. Permanezca y muévase a lo largo de los recorridos marcados u obvios. De no estar marcados o ser obvios, defina uno, pero sólo uno.
11. Aprenda a reconocer los depósitos cavernarios que pueden ser dañados al caminar o arrastrarse sobre ellos, tales como paleosuelos, sedimentos fluviales, cortezas, pisos falsos, potenciales locaciones arqueológicas o paleontológicas, espeleotemas, perlas de cuevas, raíces, entre otros.
12. Pise y apoye las manos con cuidado.
13. Lave su ropa y botas con regularidad, de modo que minimice la diseminación de hongos y bacterias.
14. Si un sitio está degradado, examine con cuidado la posibilidad de utilizar otra ruta. Pero cualquier alternativa no puede causar la misma o mayor degradación que la que se pretende abandonar. De existir una alternativa sugiérala a la autoridad correspondiente y reporte la degradación.
15. Acarree consigo material marcador mientras explora y restaure las señalizaciones dañadas. Marque aquellas áreas sensibles que considere han sido dañadas y repórtelo a las autoridades correspondientes.
16. Si es imprescindible caminar sobre cristalizaciones en el piso (el llamado flowstone) hágalo quitándose las botas y ropa enfangada o, simplemente, no proceda. Muchas veces es mejor evaluar la situación y regresar en otro momento con el equipamiento adecuado.
17. Trate la biota (flora y fauna subterránea) con cuidado y respeto. Cuídelos y evite dañar sus refugios y trampas. Evite también, en lo posible, iluminarlos de forma directa.
18. Si encuentra restos óseos a lo largo de las vías existentes o propuestas muévalos a una locación segura fuera del paso si es posible. La colecta sólo debe realizarla personal especializado y con la aprobación correspondiente.

- 19. Si come dentro de la cueva, procure que no caigan restos y fragmentos pequeños de comida ya que pueden impactar la biota. Una vía es llevar una bolsa plástica para comer dentro de ella y coleccionar todos los restos. La bolsa, luego, es doblada y llevada fuera de la cueva.
- 20. Asegúrese que toda la materia extraña es removida de la cueva. Esto incluye desde los desechos humanos (orina, heces) hasta las baterías usadas y el carburo, fragmentos de sogas y ropas, papeles y cualquier otro material trasladado por el grupo explorador. Si es necesario realizar largas permanencias bajo tierra, garantíse que en el inventario de medios se incluyen contenedores plásticos para los desechos.
- 21. Cuando sea necesario clavar anclajes artificiales para escaladas o descensos, colocación de equipos e instrumentos, cerciórese de proteger el sitio para realizar el menor daño posible. Por ejemplo, proteja anclajes frecuentes, como troncos de árboles, con sacos o mantas. Use clavijas sólo donde los anclajes naturales resulten inapropiados.

Al explorar cuevas nuevas o extender la exploración hacia sitios desconocidos en una misma cueva, el Código reza así:

- 1. La primera vez que un conducto subterráneo es explorado, la microbiología de la cueva (hongos, bacterias y protozoos en general) seguro se contaminará irreversiblemente. Si la microbiología de la cueva no ha sido estudiada trate de incluir un microbiólogo en la exploración inicial, para que colecciona muestras no contaminadas.
- 2. No explore un área nueva si no está preparado para ello y, en consecuencia, para realizar las actividades espeleológicas mínimas. Recuerde las cuatro faltas.
- 3. Las actividades mínimas son el levantamiento topográfico y la señalización, no la exploración puramente.
- 4. Asegúrese que todas las rutas alternativas han sido examinadas mediante el mapa de la cueva, antes de atravesar áreas sensibles. Lo cual puede resultar innecesario.
- 5. Una vez determinado que un área sensible debe ser cruzada, identifíquela siempre. Reduzca los daños futuros definiendo un sendero mínimo.
- 6. Discuta con el grupo todas las alternativas de señalización y evalúe cada idea antes de proceder al marcaje.

En ambos casos, invariablemente, explore despacio. Pero además, en las cuevas:

- No tome nada, excepto fotos.
 - No deje huellas, excepto las de sus propias pisadas.
 - No mate nada, excepto el tiempo.

Reglas básicas de la exploración espeleológica

Determinados principios básicos no deben ser jamás violados. La actividad espeleológica no es peligrosa, pero algunas situaciones pueden serlo. La disciplina es fundamental y en esencia, vale citar las reglas básicas siguientes:

- 1. Jamás, bajo ningún concepto, explore solo. Eso es temerario y peligroso. La exploración espeleológica es una actividad de equipo, donde prima el espíritu de equipo y no es competitiva. Se trata de un colectivo interdependiente de personas que se mueven en un medio extraño y potencialmente hostil, donde las acciones de una sola persona pueden poner en peligro a todo el equipo.

- 2. El número adecuado de personas está entre 3 y 10, pero 4 parece ser el número más conveniente, como antes se explicó. Grupos mayores pueden ser divididos para explorar secciones diferentes. Cada equipo tendrá un jefe que debe ser el más experimentado o el mejor conocedor de la cueva.
- 3. El equipo se debe mover como una unidad y tan rápido como el miembro más lento, deteniéndose periódicamente a descansar. Mantenga contacto visual o a viva voz entre los miembros del equipo y no deambule solo por la cueva. Un team fragmentado, con poca comunicación entre sus miembros, es una invitación a los problemas. En un paso peligroso o complicado (escalada, descenso o paso horizontal) no se retire hasta que el espeleólogo que le sigue no haya logrado vencerlo. Los miembros del team deben estar al tanto de la situación de sus compañeros y listos para ayudar.
- 4. La exploración demanda mucho físicamente. El explorador debe estar en buena forma física, ya que una persona en pobres condiciones físicas se cansará más rápido, hará más lenta la marcha, acortará el viaje y, lo que es peor, puede poner en riesgo al team. Se deben conocer los propios límites y no intentar viajes u operaciones que sobrepasen las capacidades individuales. Los principiantes deberán comenzar con viajes cortos de dos a cuatro horas e ir incrementando el tiempo y la complejidad con entrenamiento y estudio. Si tiene dudas de las dificultades que podrá enfrentar en una cueva determinada, asesórese con un espeleólogo experimentado que la conozca. En caso de alguna enfermedad crónica es mejor consultar al médico antes de emprender la exploración e informar su condición a sus compañeros de equipo antes del viaje.
- 5. Ni drogas ni alcohol. La espeleología es una actividad sana. Esto es un problema real en tanto la exploración espeleológica requiere preparación mental para responder con agilidad, seguridad y eficiencia ante cualquier situación de peligro.
- 6. Use ropa adecuada. Resistente e impermeable. Y medios de protección e iluminación; un casco para proteger la cabeza, guantes y, al menos tres fuentes independientes de iluminación.

ALGUNOS ASPECTOS ÉTICOS DE LA EXPLORACIÓN SUBTERRÁNEA

La Espeleología es una actividad en la que deben primar la cortesía y el respeto hacia las personas que ejercen la propiedad o la administración de las cuevas o de los sitios donde ellas se encuentran. En esencia, debe observarse lo siguiente:

- Siempre solicite autorización al propietario del terreno o al administrador de la cueva, para penetrar en ella. La mayor parte de las cuevas están situadas en áreas rurales pero ello no significa que están abiertas a todo el mundo todo el tiempo.
- Si es necesario traspasar una puerta cerrada o tanquera, ciérrela siempre. Incluso si la encuentra abierta. Si necesita saltar la cerca, hágalo cerca de un poste, para minimizar el daño a los alambres.
- Evite pasar sobre terrenos cultivados o sembrados. Siempre pregunte a la persona en cuyos terrenos se encuentra la cueva por dónde prefiere que se acceda a ella.
- No deje residuos de carburo o baterías en los terrenos dedicados a pastos o a cultivos. Disponga de un contenedor para evacuar tales residuos fuera de las áreas de interés.
- Al retirarse de la cueva coloque nuevamente las barreras que se hayan puesto para evitar que el ganado caiga o penetre en ella.
- Preséntese y presente a los miembros de su equipo al administrador de la cueva o al propietario de los terrenos donde ella se encuentra. Dedique un tiempo a sa-

- ludar y explicar lo que pretende hacer bajo tierra y persuádalo de que usted y su equipo tienen las competencias necesarias para satisfacer esos propósitos.
- Agradezca siempre su hospitalidad y dedique un tiempo, también, para despedirse, comentar sus resultados y ofrecerle algunas recomendaciones, a menos que sea demasiado tarde en la noche, ya que muchos habitantes de las zonas rurales duermen temprano. Pero hágale saber que usted regresó sano y salvo y comuníquelo cualquier asunto anormal que haya encontrado. En las áreas rurales retribuya su agradecimiento ayudando en ciertos trabajos agrícolas.
- Haga silencio por la noche, si pernocta en el lugar. No moleste ni haga ruido. Tampoco realice actividades que atenten contra las costumbres del lugar.
- Muchas de las personas que tienen cuevas en sus terrenos jamás las han visitado, así que no dude en suministrarle fotos y mapas de las mismas.
- Abandone la cueva, su entrada, el sendero que lo conduce a ella y los sitios por donde haya pasado, más limpios que como los encontró.
- Si se le niega la visita a la cueva, abandone el lugar. Exponga sus necesidades y, en casos, de las autorizaciones oficiales de que disponga. Muchas personas niegan el acceso a sus terrenos por causa de experiencias desagradables con grupos anteriores. Use siempre la persuasión. Si una entidad oficial ha requerido sus servicios para explorar la cueva, diríjase a las autoridades de la comunidad para que le ayuden.
- Si la cueva está localizada en un Área Protegida de cualquier categoría, siempre se requerirá de un permiso para ello. Cumpla las disposiciones que la legislación marca al respecto.

La Unión Internacional de Espeleología ha publicado el Código de Ética aprobado en 1997 (con las adiciones en el 2001) para las expediciones que, en países extranjeros, llevan a cabo los grupos miembros de la UIS.

Antes de salir de su país

En muchos casos es necesario que las autoridades del país que se va a visitar otorguen un permiso. Del mismo modo, debe informarse a la asociación nacional del país que se visita, en caso de no existir, debe contactarse con el “delegado de la UIS” en ese país.

De ser posible, organice expediciones junto con espeleólogos del país que visita. Las asociaciones nacionales de espeleología de cada país estarán familiarizados con los requerimientos oficiales para expediciones extranjeras, así como el archivo de los informes de la expedición y las publicaciones, también de las regulaciones acerca de la colecta y normas o leyes sobre el transporte de material proveniente de las cuevas para estudios científicos.

Durante la expedición

Los miembros de la expedición deben respetar las leyes del país y las tradiciones locales, entender que algunas cuevas son consideradas como lugares sagrados, y por tanto, tienen gran significado cultural o religioso. La investigación y exploración de ese tipo de cavidades puede estar restringida.

Los miembros de la expedición no deben dañar las cuevas, cavernas, cavidades o cualquier cosa en el interior de estas. Ellos deben auxiliar y asesorar a las comunidades locales en la preservación y protección de estos ambientes.

Después de la expedición

Las muestras colectadas por la expedición sólo deben ser extraídas de las cuevas, cavernas, o del país de origen si la exportación de este tipo de material es permitida y si se han cumplido correctamente los procesos de exportación.

Deben remitirse copias de las publicaciones y mapas producidos por la expedición a todos los clubes de espeleólogos participantes, así como a la organización espeleológica o al delegado de la UIS en el país donde se llevó a cabo la expedición.

La asistencia y apoyo proporcionado por distintas organizaciones durante la expedición debe ser reconocida en las publicaciones que se produzcan.

Respeto a las actividades de otros grupos

Antes de emprender una expedición a una región, se debe investigar acerca del trabajo previo o las exploraciones actuales por grupos locales o extranjeros, con el propósito de no interferir en los proyectos que se estén llevando a cabo.

Debe darse el crédito correspondiente a las exploraciones previas en los reportes y publicaciones de la expedición.

Si sucede que varios grupos se encuentran trabajando en la misma área, se debe aprovechar la oportunidad de aprender unos de otros y coordinar futuras actividades.

Addenda al Código Ético de la UIS (Aceptado en Brasilia DF, Brasil, 2001)

La UIS exhorta a todos miembros de la Mesa Directiva y delegados nacionales, que, si tienen conocimiento de la organización de una expedición en algún país extranjero, de inmediato contacten e informen al Delegado Nacional del país a ser visitado.

Si un miembro de la Mesa Directiva descubre una violación a su código de ética, en relación con expediciones al extranjero, verá al delegado de la expedición del país de origen, para sugerir que los descubrimientos de la expedición o reportes no sean aceptados en ninguna publicación o evento patrocinado por la UIS.

Para las expediciones organizadas por países con alto desarrollo espeleológico, a países con menor desarrollo, el grupo expedicionario debe de hacer su mejor esfuerzo para transferir sus conocimientos y promover la actividad espeleológica local.

Documentación espeleológica. La primera fase de la protección del medio subterráneo

Todo el material que se logra producir y reunir acerca del estudio de una caverna, ya sea escrito o dibujado (material gráfico o digital incluso), se conoce como documentación espeleológica y entre dicha documentación se consideran los siguientes materiales:

- Mapas, croquis y esquemas de las cavernas realizados de una forma u otra.
- Toda la información primaria recopilada durante el proceso de trabajo de campo, tanto para confeccionar los mapas como informes o el desarrollo de investigaciones.
- Descripción o estudios realizados de la caverna.
- Planillas de levantamiento topográfico y de catastro.
- Informes de visitas, exploraciones, excursiones o expediciones.
- Fotos y dibujos.
- Planillas de recogida de información primaria.
- Libretas de cartografía.
- Planillas de cartografía.
- Hojas o planillas de catastro espeleológico.
- Informes de salidas, trabajos de campo y expediciones.
- Simbología espeleológica y carsológica.

Todo este material permite compilar una base de información acerca de una caverna, un sistema de cavernas o región cársica, según sea el objetivo, que a la vez favore-

ce y facilita cualquier trabajo de investigación o información posterior. La correcta compilación y adecuada conservación de toda la información espeleológica recopilada, debe constituir una actividad fundamental para cualquier organización espeleológica, ya que ella permite poner en uso y valor todo su arduo trabajo.

Además, están los archivos de información espeleológica en los que se deben reunir y conservar de forma ordenada los materiales siguientes:

- Mapas finales de las cavernas y las regiones de cavernas.
- Cartas topográficas.
- Informes de trabajo y expediciones.
- Información de campo o primaria, debidamente archivada según fechas de salidas, etcétera.
- Información guardada en formato electrónico o digital.
- Archivo de fotos, dibujos y esquemas.

TOPOGRAFÍA SUBTERRÁNEA

El mapa de la caverna es el principal aporte material que realiza el espeleólogo a partir de la todo el trabajo de exploración realizado. Además, es fundamental que todo aquel que explore una cavidad haga la representación gráfica de la misma a una escala normalizada, de modo que pueda servir de referencia a todos aquellos que la visiten o realicen trabajos de investigación en ella, como es el caso de la arqueología, la paleontología, los estudios de los espeleotemas, la ubicación de estaciones climatológicas, y otras. El mapa, croquis o esquema debe estar confeccionado de forma tal que sirva a cualquiera que lo lea, y sea capaz de brindarle información de las características de la caverna, distancia a recorrer, desniveles, depósitos de agua, abismos, entre otros.

Instrumentos y materiales más utilizados en la topografía espeleológica

Independientemente de que la mayoría de los instrumentos topográficos hallan sido creados para los trabajos en superficie, con el paso del tiempo, el desarrollo y difusión de los trabajos en ambientes confinados han provocado que se adapten o se fabriquen instrumentos especiales para el trabajo en cavernas, minas y subterráneos, mientras que otros se han adaptado o adoptado para estos trabajos. A continuación se presenta una relación de los instrumentos más utilizados en los trabajos de levantamiento topográfico de las cavernas, los cuales pueden ser subdivididos de acuerdo a la medición para la que estén destinados: distancias, desniveles y ángulos.

Distancias: cintas métricas, topofil (Topohilo), tránsitos, telémetros, distanciómetro láser.

Desniveles: clinómetro y teodolitos.

Ángulos: teodolitos, taquímetro y brújula

A estos instrumentos se han sumado en los últimos años una serie de equipos de medición mediante láseres que permiten obtener gran cantidad de información muy precisa, entre los cuales se deben mencionar por su aplicación en los trabajos de topografía espeleológica los siguientes:

LaserAce 300, Laser Rangefinder con clinómetro, el mismo se puede adquirir con una brújula acoplada y permite medir: pozos, profundidad, altura del techo, distancias, inclinación, rumbos y acimut. Este equipo para una medición de 300 m tiene un rango de error de +- 10 cm.

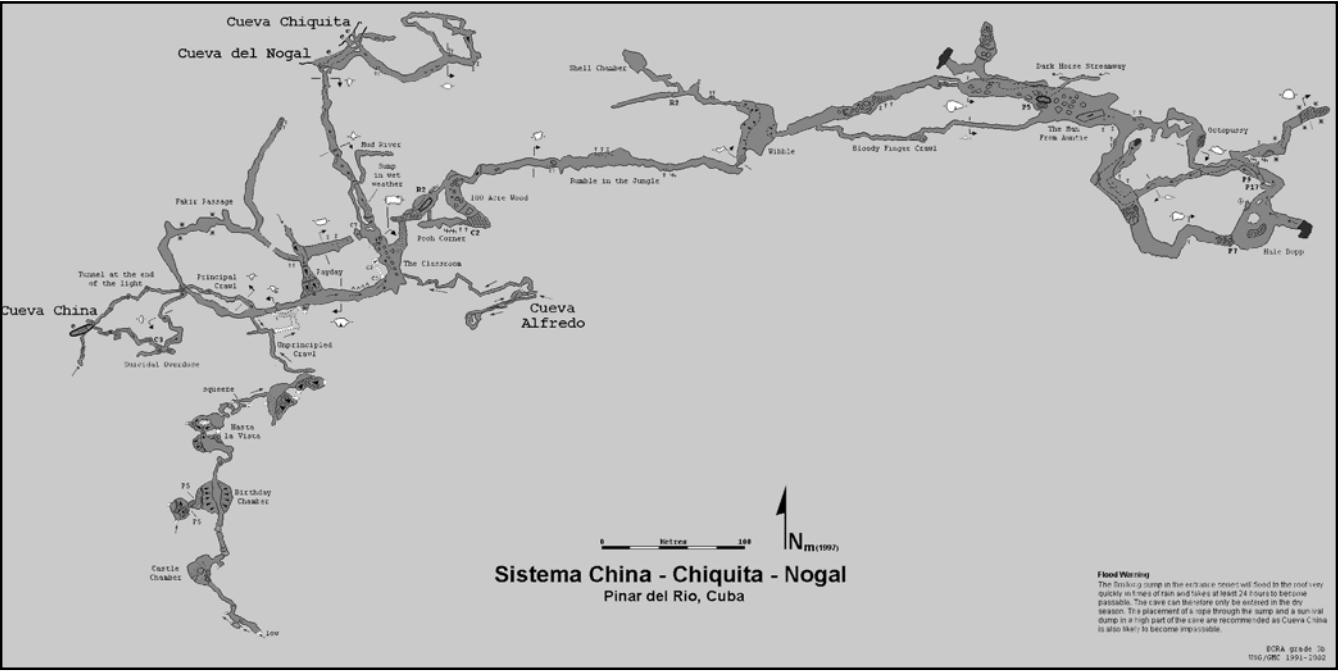


Fig. 22. Mapa de Cueva Chiquita, Sierra de los Órganos, Pinar del Río.

Para llegar a realizar el plano a escala de una cavidad se deben utilizar los métodos y sistemas adecuados de manera que se pueda representar gráficamente de la forma más precisa posible, esto es, que en él se vea la representación gráfica de la realidad. Esto debe realizarse sobre la base de dos conceptos muy importantes: la *espeleometría* y la *espeleografía*.

Espeleometría es el conjunto de técnicas que se utilizan para levantar el plano (o el alzado), del eje de la medición (poligonal), o el plano de la caverna, ya sea mediante mediciones poligonales, radiales o triangulares. Esta será la fuente de la obtención de los datos que permiten la medición completa de la cavidad. La espeleografía, es la representación gráfica de las características espaciales de la cavidad, quiere decir, su forma, altura, profundidad, altura del techo, obstáculos, depósitos de agua, espeleotemas y todo aquello que se considere de interés o se desee representar en nuestra representación final.

SmartLevel HAS: posee clinómetro y además da las distancias, para lo cual está diseñado. Asimismo, en la localización de cavernas y el mapeo de las formas cársicas exteriores tiene gran aplicación el GPS (Sistema de posicionamiento global), así como para trazar las rutas y la navegación hacia las entradas de las cavernas. Para el levantamiento topográfico en las cavernas se ha desarrollado o adoptado una serie de materiales que facilitan o benefician el trabajo y que de hecho son imprescindibles, entre ellos: libretas de trabajo con papel plástico impermeable, lápices que escriben en cualquier condición y cintas adhesivas fluorescentes, utilizadas para marcar puntos.

Trabajo topográfico en una caverna

Para construir el plano de una caverna se pueden seguir varias metodologías de trabajo, más o menos precisas, que van desde dibujar un croquis según se vaya explorando, hasta el levantamiento del plano de la caverna utilizando equipos de precisión. Los espeleólogos ingleses

hace algunos años desarrollaron una clasificación o categorización de la calidad y precisión de los planos de las cavernas sobre la base de los instrumentos empleados para ello, a los que llamaron *grados del plano* y que en la actualidad se conocen como *Grados BCRA* (referente al British Cave Research Asociation).

Representación gráfica de una caverna

En Espeleología se emplean fundamentalmente, tres tipos diferentes de representaciones gráficas de las cavernas, cada una de ellas se complementan entre sí y corresponden a:

- En planta.
- Perfil longitudinal o alzado.
- Representación de las secciones o cortes transversales de las galerías.

Tabla 10. Tipos de representaciones gráficas de las cavernas según su morfología.

Cámaras tradicionales	Cámaras digitales
Permiten regular las ASA	Dependes del número de pixels del equipo.
Es posible la iluminación sincronizada con varios flashes.	Hasta ahora eso es imposible.
Muy buena resistencia a la agresividad del medio cavernario (humedad, polvo, golpes, suciedad, etc.)	Muy sensibles a la agresividad del medio cavernario.

Utilización de las computadoras (PC), en la topografía de las cavernas

En la actualidad, es posible acceder a una gran cantidad de programas de computación (soft wear), especialmente diseñados para desarrollar el cálculo y dibujo de las cavernas basados en los datos que se le suministren después del trabajo de campo (en la caverna). Dichos programas, fundamentalmente crean un sistema de coordenadas para representar la caverna a partir de un eje principal. Muchos de los programas que se encuentran en uso ofrecen cierta cantidad de opciones al usuario, que van desde el plano en planta normal, hasta la representación tridimensional, la rotación a partir de un eje predeterminado, la resaltación por colores de los diferentes niveles, etcétera.

Tabla 11. Programas en uso.

Figura 23: Un explorador colocando anaqueles artificiales para descender a una caverna vertical.
--

Estos softwears resultan de muy fácil utilización para cualquier persona que se encuentre relacionado con el trabajo en los PC y el manejo de datos de topografía de las cavernas, por lo que no se requiere un entrenamiento especial. La mayoría de ellos pueden ser bajados de INTERNET, para el trabajo de cualquier grupo.

Grados BCRA
Norma para la confección y evaluación de la calidad de los mapas de las cavernas

- **Grado 1:** Dibujo de poca precisión, en el cual no se toma ninguna medida.
- **Grado 2:** Se emplea para definir un dibujo con precisión, comprendida entre los grados 1 y 3.
- **Grado 3:** Se trata de una topografía aproximada, llevada a cabo mediante brújula. Angulos horizontales y verticales medidos con +/- 2,5 grados. Distancias con +/- 50 cm. El error de posición de las estaciones es inferior a +/- 50 cm.
- **Grado 4:** Sirve para definir una topografía que no logre todos los requisitos del grado 5, pero que llevan mayor precisión que uno del grado 3.
- **Grado 5:** Topografía realizada con brújula. Angulos horizontales y verticales precisos (+/-1 grado), distan-

- cias precisas (+/-10 cm). El error de posición de las estaciones es menor de +/-10 cm.
- **Grado 6:** Topografía realizada con brújula, pero con precisión superior al grado 5.
- **Grado X:** Topografía en la que la brújula ha sido sustituida por el teodolito.

Estos grados van acompañados de una valoración del cuidado puesto en los detalles complementarios, que se representan por una letra añadida después del grado:

- **Clase A:** Todos los detalles de memoria.
- **Clase B:** Los detalles de la cavidad fueron estimados y anotados en ella.
- **Clase C:** Medidas de detalles hechas solamente en las estaciones de topografía.
- **Clase D:** Medidas de detalles hechas en las estaciones topográficas y en caso necesario, entre ellas, con el fin de señalar cambios significativos en la forma, dirección, y otras características de la cavidad.

PROGRESIÓN VERTICAL



Fig. 23. Un explorador colocando anaqueles artificiales para descender a una caverna vertical.

Uno de los principales problemas que encontraron los pioneros de la exploración de cavernas fueron los pasos verticales en el interior de ellas o los accesos y entradas completamente verticales en algunas cavernas. Ahora bien, esos hombres (los pioneros de la Espeleología como Eduardo Alfredo Martel), en su afán de conocer y explorar el mundo subterráneo, se han servido de los más diversos medios para superar los obstáculos verticales en las cavernas, utilizando para ello, desde los más simples elementos, hasta llegar a las más complejas y sofisticadas técnicas, que ofrecen al explorador la seguridad de poder vencer cualquier obstáculo por difícil que este se le presente, siempre y cuando domine la técnica.

Lo logrado en cada época, hasta la actualidad, no es más que el resultado lógico de una continua e indetenible evolución y desarrollo del equipamiento utilizado y de los sistemas y métodos para su empleo, todo ello combinado con un trabajo responsable de investigación a partir de la experiencia de gran cantidad de exploradores, los cuales han puesto su inteligencia y perseverancia en función del perfeccionamiento de las técnicas y equipos destinados a la exploración.

La *Técnica de la Cuerda Única*, (TCU), o *Single Rope Technic*, *Técnica de Solo Cuerda*, o cualquiera de los nombres con los que se le denomina, comparada con otras formas de progresión que puedan utilizarse y se han utilizado en la exploración de cavernas verticales, es de muy reciente creación, fue concebida y desarrollada a finales de los años 60, y alcanza su auge en la década de los 70 gracias a la invención, perfeccionamiento y comercialización de una serie de aparatos mecánicos y su aplicación en la exploración de cavidades subterráneas. La aplicación de esta novedosa técnica en su tiempo signi-

ficó una verdadera revolución en la exploración de cavernas.



Fig. 24. Descenso mediante la técnica de la cuerda única, evitando una cascada.

En la preparación o instalación de una caverna vertical para su descenso, se procede a instalar la cuerda en la llamada cabecera del pozo (o caverna), tratando de que dicha instalación sea perfecta o lo más semejante a la perfección (siguiendo la técnica adecuada), y haciendo tantas desviaciones de la cuerda como sean necesarias, de manera que ésta nunca llegue a tocar la roca que forma las paredes de la caverna, lo cual brinda al proceso de descenso o ascenso una gran seguridad, al eliminarse la posibilidad de corte o desgaste de la cuerda por fricción con las rocas.



Fig. 25. Descenso, mediante la técnica de cuerda única, en caída libre desde una dolina.

El enorme desarrollo y la gran aceptación alcanzada entre los aficionados a la espeleología, hacia la práctica de esta técnica es consecuencia directa de una serie de avances técnicos y el diseño de mejores y más seguros equipos en su práctica, entre ellos:

- Utilización de las expansiones autoperforantes de uso industrial en la práctica de la espeleología vertical.
- Cuerdas confeccionadas con materiales sintéticos, cada vez con mejores características técnicas, mayor resistencia y mucho más ligeras.
- Aparatos mecánicos de ascenso, descenso y seguro, cada vez más ligeros, cómodos y seguros, fáciles de manejar y mucho más confiables.

Entonces, se puede afirmar que la TCU se caracteriza por el empleo de anclajes artificiales y fraccionamientos, con el propósito de evitar los roces de la cuerda sobre la roca y el empleo de una sola cuerda, que penda lo más libremente posible, para ser utilizada tanto para bajar como subir, auxiliados de aparatos mecánicos y técnicas o métodos adecuados.

PROGRESIÓN EN CONDUCTOS INUNDADOS:ESPELEOLOGÍA SUBACUÁTICA

El espeleobuceo es considerado, no sin razón, el aspecto más técnico y riesgoso de la espeleología, así como la modalidad de buceo de mayor riesgo. Estos peligros se pueden calcular y controlar gracias a un entrenamiento adecuado, equipamiento especializado, normas inviolables, gran disciplina y sentido de la responsabilidad (sentido común). Si no se toman en consideración estos principios no es posible realizar con éxito y seguridad esta compleja pero fascinante actividad que es el instrumento imprescindible para el estudio e investigación de las cavidades subacuáticas.

Según los historiadores de esta disciplina el primer buceo en cuevas registrado se remonta a una fecha tan temprana como el año 1773 del siglo XVIII, en Inglaterra, por un buzo desconocido. Ya en el siglo XIX, en 1878, se recoge en la historia que en Francia, en la famosamente conocida *Fuente de Vaucluse*, muy cerca del poblado de Aviñon se realiza por primera vez una inmersión con escafandra clásica y suministro de aire desde superficie, esta vez descendiendo a una profundidad de 21 m un buzo nombrado Ottonelli. Ya en 1922, el espeleólogo francés Norbert Casteret realiza el paso de un sifón en Montespan logrando importantes descubrimientos, pero lo más insólito de esta exploración es que se realiza en apnea, técnica completamente desaconsejada hoy día.

Luego, en 1930 en Norteamérica, buzos del Smithsonian Institution con escafandra pesada y suministro de aire de superficie recuperan en el sitio de *Wakulla Springs*, al norte de Florida, un esqueleto completo de Mastodonte. Continúan las exploraciones en Norteamérica y Europa donde en 1946, en la ya citada *Fuente de Vaucluse*, Jacques Y. Cousteau y Frederic Dumas llegan a la profundidad de 50 m con la recién inventada *escafandra autónoma*.

En realidad, es partir de la creación de la escafandra autónoma durante la década del 50 del siglo XX que comienza el auge de la actividad conocida hoy como espeleobuceo, y su práctica se centró sobre todo en Inglaterra, Francia y Estados Unidos. Ya entre los años 60 y 70 del pasado siglo se comienza a extender la práctica del buceo en cuevas, y a consecuencia del desarrollo técnico que alcanzan los equipos de inmersión se amplían las posibilidades de exploración de cavidades inundadas. Entonces se crean las primeras organizaciones especializadas en esta disciplina técnica, la cual comienza a sustentarse con un soporte de normas y sistema de entrenamiento especiales y manuales que analizan ampliamente el tema.

En los años 90 esta actividad se extiende a otras áreas del mundo y aumenta el número de sus practicantes con el consiguiente crecimiento del índice de accidentes, lo que obliga a las organizaciones ya creadas a

estudiar, ampliar y aplicar con más rigurosidad todo el sistema de enseñanza, entrenamiento, normas y reglas del espeleobuceo.

Tipo de cavidades inundadas

Es el principal factor que determina la forma de acometer una exploración subacuática en cuevas y cavidades artificiales inundadas, es también el elemento que dicta la filosofía y normas del buceo en ambiente confinado tan diferentes a las del buceo recreativo de aguas abiertas. A los efectos del espeleobuceo se dividen en:

- Total o parcialmente inundadas con sus complejidades a la hora de plantearse una exploración.
- En *sifones* que son sectores inundados de una cavidad predominantemente aérea la cual conduce a métodos diferentes de exploración.

En espeleobuceo, contrario a la espeleología convencional, la caverna es la parte iluminada de cualquier cavidad, mientras que la cueva es la zona de oscuridad perpetua.

Peligros comunes y específicos en la exploración de cavidades inundadas

El espeleobuceo se caracteriza por una serie de peligros comunes y específicos a la hora de realizar una penetración:

- No acceso directo a superficie (ambiente confinado).
- Ausencia total de luz (oscuridad).
- Estar sumergido en agua (imposibilidad de respirar).
- Tipos de sedimentos (arenoso, arcilloso, orgánicos, etc.).
- Corrientes (a favor de la penetración o en contra).
- Configuración de las galerías (restricciones, formaciones secundarias etc.).
- Profundidad (límites de buceos con diferentes mezclas de gases, narcosis por nitrógeno, descompresión etc.).

Factores de accidentes en espeleobuceo. Análisis de accidentes

Según la NSS-CDS de Estados Unidos de América un número mayor a 400 buzos han perdido la vida en inmersiones, en cavidades inundadas en ese país desde la década de los años 60. En Cuba se lamenta tres accidentes con el saldo de 7 fallecidos en igual periodo de tiempo. Esto no significa que el buceo en nuestras cuevas fuese lo suficientemente seguro hasta la creación de la SNE-SEC, sino todo lo contrario. Si se analiza la incidencia de accidentes y la cantidad de practicantes en estos dos países hay que reconocer que aunque las cifras son abismalmente distintas, los resultados finales se acercan debido a la relación No. de accidentes No. de buzos. El hecho es que la mayor parte de estos accidentes y fallecimientos son evitables según los cuidadosos estudios, de las circunstancias de los mismos desde 1967, realizados por los colegas de la NSS-CDS. En 1975 el pionero del espeleobuceo Sheck Exley esclareció las tres principales violaciones de las reglas de seguridad; más adelante la NSS-CDS revisó la lista de violaciones y halló dos nuevas fuentes de incidencias, los resultados de dichos estudios fueron llamados *Análisis de Accidentes*.

Factores de accidentes para la comunidad de buceo general:

1. Deficiencia o ausencia en el entrenamiento de buceo en cuevas (factor de mayor contribución).
2. Suprimir la instalación de una línea continua hasta la zona de aguas abiertas (esta es la causa directa más común en fatalidades del buceo en cuevas y cavernas.).
3. Omisión de reservar como mínimo 2/3 del suministro de aire inicial para la salida, también conocido como regla del tercio (segunda causa directa más común en estos tipos de accidentes).
4. Exceder los límites de profundidad para el nivel de entrenamiento. (El límite máximo para el espeleobuzo de nivel básico es de 25 m, nivel medio 30 m y para cualquier actividad de buceo recreacional en cuevas es de 40 m) (tercera causa más común de fatalidades en buceos de cuevas y cavernas).
5. Prescindir del uso de al menos tres fuentes de iluminación (mayor factor contribuyente a hechos fatales en buceos en cuevas y cavernas).



Fig. 26. Cavidad inundada típica de la costa este de la Bahía de Cochinos, Matanzas. Casimba Cocodrilo, 46 m de profundidad.

Cuadro 3. Records de cuevas inundadas en Cuba (hasta marzo del 2003).

Cueva marina más profunda	Cueva (Blue Hole) Ojo del Mégano, Costa norte de Villa Clara, 70 m de profundidad.
Cueva más profunda	Casimba XXXIV Aniversario, Playa Girón, Ciénaga de Zapata, Matanzas, -73 m.
Cueva de mayor extensión	Tanques Azules de Gibara, Caletones de Gibara, Holguín, 2800 m de extensión total.
Cueva de mayor descenso Para alcanzar el espejo de agua	Sima de Rolando, Sierra de Cubitas, Camagüey, -82 m de caída libre hasta el lago.
Cuevas de mayores perspectivas en exploración	Cueva de Chicharrones, Bolondrón, Matanzas, -30 m de profundidad y 650 m de recorrido lineal instalados hasta el presente. Cueva de Luis Piedra, Quivicán, La Habana, 8 m de profundidad máxima y 1300 m de línea instalados hasta el presente.
Zona del país más explorada desde el punto de vista del espeleobuceo	Sistema espeleolacustre Ciénaga de Zapata, Matanzas, con 22 cavidades exploradas.
Travesía más larga de Cuba	Casimba Mona-Casimba Dagmar el recorrido de 320 m a una profundidad ~ de -35 m.
Zona menos explorada	Abalones de Cienfuegos

REGLAS ELEMENTALES DE SEGURIDAD

La siguiente lista de recomendaciones es importante, pero la Regla de Oro es no apartarse del sentido común.

1. No explorar jamás solo. Un mínimo aconsejable son cuatro personas.
2. Lleve un casco adecuado, con correa a la barbilla, al que acople la fuente primaria de iluminación.
3. Lleve siempre tres fuentes independientes de iluminación.
4. Comunique a otras personas la cueva y localización de la cueva que visitará y la fecha y hora de su regreso, añada algunas para prevenir cualquier contingencia.
5. Siga las indicaciones del espeleólogo más experimentado o de aquel que conozca bien la cueva.
6. Si toda su iluminación falla, siéntese y espere que lo rescaten.
7. Evite saltar. El piso de las cuevas casi nunca está a nivel y un salto pequeño puede provocarle una herida.
8. Practique las técnicas de cuerda bajo la guía de un experto antes de hacer espeleología vertical. Mucho menos bucee en una cueva sin estar entrenado para ello.
9. La exploración es en extremo agotadora: conozca sus límites, descanse con frecuencia y observe las señales de fatiga en quienes le acompañan.
10. Las personas con problemas médicos crónicos deben considerar seriamente el momento que deciden realizar espeleología.
11. Lleve consigo un pequeño equipo de primeros auxilios. Porte ropa contra el frío y la humedad.
12. Si ocurre un accidente que lo inmovilice, prevenga al accidentado contra el frío y comuníquese con el servicio nacional de espeleosocorro.
13. Estar sentado puede causar temblores al cabo de cierto tiempo, lo que es el primer síntoma de hipotermia. Manténgase en movimiento realizando alguna actividad.
14. El espeleólogo más lento marca el paso de la partida. Vaya tan rápido como pueda ser seguido y chequee siempre al explorador detrás suyo.
15. Si se pierde –lo que no tiene por qué ocurrir– el pánico es su mayor enemigo. Conserve la calma y su iluminación. Si siguió la regla 4, espere y no se preocupe. Irán por usted.

USO DE TRAZADORES

Los trazadores se emplean con mucha frecuencia en la exploración espeleológica para confirmar conexiones entre puntos de absorción y descarga o para comprobar la conexión entre diferentes cuevas o galerías. El experimento consiste en inyectar cierta cantidad de trazador en una corriente de agua y observar su salida en el punto o los puntos con los cuales se supone que exista conexión. Este tipo de experimento, cualitativo, y pasivo, sin embargo, no permite obtener informaciones más valiosas sobre la distribución y régimen hidrodinámico de las redes subterráneas. Los experimentos con trazadores aportan información sobre la velocidad media de la corriente, la dirección del flujo, el tiempo de tránsito, renovación y residencia de las aguas, la capacidad de almacenamiento del sistema subterráneo.

Un trazador ideal es aquel que se mueve a la misma velocidad que el agua. Para ello se precisa que:

- No interaccione con el terreno (no sea absorbido, ni sufra procesos de intercambio iónico).
- Sean solubles en el agua (no se precipite ni sea retenido por filtración mecánica).
- Sea estable química y biológicamente en el agua en la que se utiliza (no se oxide ni se reduzca, y que no se descomponga).
- Pueda ser añadido al agua sin alterar las propiedades físicas y químicas del agua.
- No altere la permeabilidad y porosidad (propiedades del acuífero).
- No contamine permanentemente el terreno, después de efectuado el ensayo.
- Se detectan fácilmente.

Son condiciones importantes en el trazador ideal artificial:

- Que baste con utilizar pequeñas cantidades.
- Elevada solubilidad.
- Que se pueda detectar aún en condiciones muy bajas de concentración de forma cuantitativa.
- Fácil de manejar.
- No tóxico ni molesto.
- Barato y fácil de obtener.
- Que de ser posible no exista en el agua (o en pocas cantidades) y que el terreno no lo aporte naturalmente.

Los trazadores artificiales son de muy diverso tipo, como sólidos en suspensión, salinos, colorantes e isotópicos (radioactivos o estables).

Trazadores sólidos en suspensión, solo tienen alguna aplicación cuando el agua circula por grandes grietas como el caso de conductos cárlicos muy desarrollados, ya que en presencia de sifones son retenidos.

Trazadores químicos solubles, aquellos que disueltos en el agua se identifican con facilidad. En este grupo se encuentran los trazadores salinos. Éstos son bastante solubles por lo general, el más utilizado es el ión de cloruro, que resulta un trazador casi ideal. Si el agua es originalmente poco salina, la concentración se puede medir por conductividad, ya que como se conoce, al disolverse la sal en el agua los aniones y cationes se separan por acción de las moléculas polares del agua, empiezan a moverse libremente y la disolución comienza a ser conductora.

Radiactivos, como el H³ son muy importantes y presentan notables ventajas sobre los trazadores químicos, pero su manejo es más delicado y caro.

FOTOGRAFÍA DE LAS CAVERNAS

La fotografía espeleológica o fotografía de las cavernas nació, se desarrolló y ha evolucionado a la par que la fotografía normal y por solo poner un ejemplo en ella se han utilizado desde las antorchas de magnesio, hasta las lámparas electrónicas titilantes, con sensores capaces de borrar espacios de sombras y otros problemas provocado por la ausencia de iluminación.

Asimismo, han evolucionado los objetivos de la toma de fotos en las cavernas, desde las fotos que al principio se hacían para destacar y recordar el espíritu aventurero, valor o fuerza de los primeros exploradores de los oscuros y misteriosos espacios subterráneos, ésta fue pasando gradualmente a una poderosísima herramienta para el estudio y documentación de las cavernas, y llegar a ser un verdadero arte, a través de la cual se expresan y divulgan las extraordinarias bellezas del paisaje subterráneo.

Cámaras

Aunque existe una enorme cantidad de modelos, marcas y tipos de cámaras, hasta ahora, la ideal y con mayor versatilidad para el trabajo en las cavernas son las pentaprismas de 35 milímetros (esto significa que lo que uno ve por el visor es la imagen normal que se quiere fotografiar, más pequeña cuando se aleja o rota el lente, más grande cuando se acerca el lente, es decir, se le da o resta potencia al lente).

Estas cámaras permiten controlar una serie de parámetros, los cuales dan la oportunidad de obtener los resultados deseados o requeridos por un tipo u otro de fotografía, estos parámetros regulables son:

- Regulación de la velocidad de obturación.
- Regulación de la abertura del diafragma.
- Cambio de los lentes según las necesidades o requerimientos.
- Cambio de los flashes según su potencia y el uso de más de uno de ellos.

Además, las cámaras de este tipo, por su construcción resultan muy robustas, y por tanto, muy resistentes a la agresividad del medio cavernario en el cual se van a utilizar, de igual modo permiten que a pesar de estar cargadas con el rollo de película se puedan desarmar parcialmente, y se protejan con más seguridad. En la actualidad, las cámaras fotográficas con formato digital han alcanzado mucha difusión, sin embargo, sus características constructivas e internas así como su costo en el mercado, han impedido que alcancen gran aceptación entre los foto espeleólogos, véanse algunas de dichas razones:

- Estas cámaras no permiten utilizar flashes adicionales (esclavos).
- Resultan sumamente sensibles a la agresividad de los ambientes subterráneos (humedad, polvo, golpes, fango, etc.), por lo que en caso de utilizarse se deben extremar las medidas de cuidado y protección (todo lo que ocasiona gastos suplementarios).
- En la enorme mayoría de los modelos disponibles en el mercado resulta imposible intercambiar los lentes, según los requerimientos de la foto o del fotógrafo.

Todas adolecen de un gran consumo de energía, lo que puede ocasionar otros problemas al tener que intercambiar las baterías en el interior de la caverna, en presencia de los altísimos porcentos de humedad, polvo, fango y otros inconvenientes que existen en el interior de las cavernas (ver Tabla No. 15).



Fig. 27. Panorámica de un gran salón cavernario, con contraluz de la entrada. En este caso la Caverna Martín Infierno en Sancti Spiritus.

Tipos de fotos

La selección de la velocidad, la abertura de diafragma, el tipo de lente por el que se obtiene, el tipo de película, número de ASA y la propia calidad de la película, así como el tipo de iluminación o la potencia y cantidad de flashes que se utilicen para hacer una foto dependen del tipo de foto que se quiera o se necesite hacer, ya sea el detalle de un espeleotema, el close up de un insecto o un murciélago, o la vista panorámica de un salón cavernario o de una galería en donde se quiera destacar todos los detalles, la morfología del sitio etcétera.

Iluminación

En toda la etapa de desarrollo de la fotografía en cavernas, se han utilizado muchos medios para intentar iluminar los espacios subterráneos, algunos de los cuales en la actualidad podrían parecer grotescos o inverosímiles, quizás hasta descabellados, como es el caso de la iluminación de grandes salones con bengalas de señalización, antorchas de magnesio de las utilizadas en la aviación militar o equipos de arco eléctrico.

La iluminación del espacio que pretende ser fotografiado, en la actualidad se realiza con el equipo conocido internacionalmente como “flash” (de rápido, relámpago), aduciendo al efecto que producen (rápido y de una luz muy intensa, en un espacio de tiempo muy corto). Existen infinidad de modelos y marcas de flashes, los más recomendados para su uso en espeleología, son aquellos que resulten más robustos, potentes y tengan un menor consumo de energía, además de que sean de los conocidos como de “zapato caliente”, esto es que su conexión con la cámara sea directamente al cuerpo de la misma.

En los ambientes cavernarios, en los que existe una ausencia de luz total, hay que tener muy en cuenta la iluminación para lo que se pretenda obtener, dado que la escasez de iluminación provoca muy pobres resultados, mientras que un exceso de iluminación podría “quemarnos” la imagen por una sobre exposición a la luz.

Tabla 12. Cámaras tradicionales vs. cámaras digitales.

Cámaras tradicionales	Cámaras digitales
Permiten regular las ASA	Dependes del número de pixels del equipo.
Es posible la iluminación sincronizada con varios flashes.	Hasta ahora eso es imposible.
Muy buena resistencia a la agresividad del medio cavernario (humedad, polvo, golpes, suciedad, etc.)	Muy sensibles a la agresividad del medio cavernario.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL DE LAS CUEVAS

La *evaluación de calidad ambiental* de una caverna debe definir, adecuadamente:

- Calidad de la atmósfera interior de la caverna; esto es, el patrón de circulación del aire, sus propiedades físicas y químicas, la dependencia estacional de tales propiedades, tanto respecto a la influencia de la atmósfera exterior como de la propia de los diferentes salones y galerías de la cueva.
- Presencia de fauna y flora subterránea nociva a la salud humana o de fauna y flora susceptible de ser afectada por efectos secundarios de la utilización de la cavidad y su entorno.
- Efecto del uso de la caverna y del sistema subterráneo al que corresponde, sobre los patrones hidrológicos e hidrogeológicos de drenaje, en particular lo que respecta al desvío de líneas de drenaje y cambios en la composición química y la calidad del agua.
- Riesgo hidrológico de que se produzcan avenidas en aquellas cuevas que poseen circuitos activos de dre-

naje (ríos subterráneos) propios o vinculados con corrientes superficiales.

- Riesgo geológico de desprendimientos o desplomes del techo o paredes de la cueva, hundimientos del piso o deslizamientos de rocas por procesos espontáneos de masas o inducidos por el uso de la cueva.
- Efecto del uso de la cueva sobre la conservación de la belleza turística del sistema cavernario y de sus formaciones.

En la *evaluación de calidad ambiental de las cuevas* se considera: la calidad del aire subterráneo, flora y fauna subterránea, estabilidad estática y dinámica de las bóvedas y paredes, y equilibrio de los sistemas de bloques; régimen y calidad de las aguas.

Para la *evaluación de calidad ambiental del sistema soporte de la cueva* se analiza: la calidad del aire, flora y fauna, y régimen y calidad de las aguas.

Calidad del aire subterráneo

La evaluación de la calidad de la atmósfera hipogea definirá los factores de control de las propiedades físicas y químicas del aire subterráneo y la distribución estacional, dentro de la cueva y en su sistema soporte, de las variables que definen los indicadores de confort y tiempo de permanencia bajo tierra, así como el efecto del público sobre el entorno físico y biológico de la caverna en explotación. Estos indicadores son los que siguen:

- Temperatura de: el aire, sedimentos, suelo, aguas de goteo y subterráneas, de la roca y agua de lluvia.
- Frecuencia y caudal de goteo.
- Índices físicos como conductividad eléctrica del agua y pH.
- Evaporación y condensación.
- Dirección y velocidad del viento.
- Lámina de lluvia.
- Presión atmosférica y humedad relativa.
- Gases (particularmente monóxido y dióxido de carbono entre los tóxicos orgánicos y el Radón-222 entre los radioactivos).

Flora y fauna subterránea

Dentro del ambiente cavernario se reconocen tres zonas: de penumbra (cercana a la entrada), zona media de completa oscuridad y temperatura variable y zona profunda, de oscuridad absoluta y temperatura constante. La zona de penumbra tiene la mayor abundancia y diversidad faunística, en la zona media se encuentran especies que pueden observarse en el exterior y, en la zona profunda sólo aquella fauna con condiciones especiales de adaptación al hábitat.

La flora y fauna subterránea se evalúan, igualmente, en dos direcciones. Una de ellas es el *efecto del uso de la caverna sobre la biota*, que puede conducir a la alteración del equilibrio y la consiguiente emigración o desaparición de especies. La importación de especies es común, lo que provoca alteraciones del equilibrio y del ciclo biogeoquímico subterráneo. Asimismo, la presencia masiva de visitantes provoca cambios en el microclima hipogeo, cuyos efectos, se manifiestan en la modificación del número y variedad de las especies presentes, sobre todo, en la de hábitos troglobios, es decir, completamente adaptadas a la vida subterránea. Es usual que en las cuevas iluminadas de manera artificial se produzcan fuertes cambios en la temperatura y la humedad relativa del aire que provoca la rápida emigración o desaparición de especies. Las luces son, por otro lado, el hábitat de algas y briofitas. La otra es el *efecto de la biota sobre los visitantes* a la caverna, se expresan de modo benigno o sumamente agresivo. En el primer caso, es frecuente el empleo, en algunos países, de cuevas con fines terapéuticos, que incluyen el tratamiento de enfermedades respiratorias, como el asma bronquial o en ciertos tratamientos que impliquen reposo; en el segundo caso, el visitante puede adquirir enfermeda-

des respiratorias provocadas por ciertas micosis, de las cuales algunas resultan fatales, como la *Histoplasmosis*, o recibir gérmenes patógenos e, incluso, contraer enfermedades como la rabia

Estabilidad de la caverna

Debido a la emigración de sólido como consecuencia del transporte de masas que provoca el desarrollo del proceso de carsificación y, en particular, del desarrollo de cavernas, los valores de resistencia mecánica de las rocas disminuyen de manera sensible en comparación con otro tipo de rocas. Las dificultades que surgen para obtener valores representativos de los índices físico-mecánicos son numerosas y encarecen las investigaciones y la adaptación ingeniera de las cuevas, toda vez que suelen aplicarse coeficientes de seguridad muy elevados para garantizar la estabilidad de la misma o de las obras de adaptación o de servicios que tienen lugar bajo tierra. La utilización de una caverna debe satisfacer los requerimientos de seguridad ante derrumbes y desprendimientos de rocas que pongan en riesgo la vida de los visitantes y de las eventuales obras antes citadas. Con independencia de que se realicen obras de adaptación ingeniera en tales sectores, la utilización de parte de la caverna debe basarse en la adecuada aclaración de los siguientes aspectos:

- Capacidad de resistencia del piso, techo y paredes ante diferentes cargas estáticas y dinámicas, de acción prolongada o instantánea, o inducidas natural o artificialmente.
- Relación entre la estabilidad de la caverna y los pilares de roca estructural o de formaciones secundarias.
- Efectos de los mecanismos de creeping o solifluxión en la estabilidad de los casos de bloques derrumbados.
- Dirección de los eventuales trabajos de reforzamiento y ampliación artificial de los conductos o de los cambios en su morfología.
- Definición de los factores de seguridad, razonablemente permisibles, y de los criterios de maximización de los valores de seguridad de la obra.

Régimen y calidad de las aguas

Los sectores que se proponen evaluar se vinculan con conductos de funcionamiento hidrológico episódico. En tales casos, es necesario definir:

- Probabilidades de ocurrencia de avenidas en el interior de la cueva.
- Cambios que las eventuales obras de adaptación en el interior de la cueva o del sistema soporte (senderos, establecimientos, facilidades temporales) pueden promover en el régimen o en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en los sectores conectados directa o indirectamente con ellos.

MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES

Como objetivos generales del diseño y operación de una Red de Monitoreo se tienen:

- Definir el régimen, composición química y calidad física, química y bacteriológica de las aguas superficiales y subterráneas, así como contribuir a aclarar la estructura y variabilidad temporal y espacial de los factores de orden climático, geológico y geomorfológico que controlan el comportamiento del sistema cársico.
- Identificar el impacto ec hidrológico de la exploración y explotación actual de las cavidades naturales y artificiales sobre el régimen, composición química y calidad física, química y bacteriológica de las aguas superficiales y subterráneas en el territorio, de la atmósfera, sobre la salud humana y determinar el nivel de fondo (background) de las variables ambientales.

- Identificar y cuantificar las relaciones temporales y espaciales entre las variables ambientales, así como la vulnerabilidad y fragilidad de los sistemas acuíferos.
- Validar los riesgos de contaminación y pérdida general de la calidad ambiental en la caverna y su área de impacto ecohidrológico.
- Constituir la base informativa para la calibración de los modelos conceptuales y matemáticos del régimen, transporte de masas, composición química y calidad física, química y bacteriológica de las aguas superficiales y subterráneas, de la atmósfera y de los sedimentos.
- Constituir un Sistema de Prevención como elemento consustancial del Plan de Manejo Ambiental de la cueva o el sistema cársico que permita detectar las anomalías en el régimen y calidad de las variables ambientales en cualquier etapa de uso de los recursos naturales y consecuentemente, contribuya a adoptar las acciones precisas para aislar, anular o mitigar los efectos no deseados respecto a la calidad ambiental en general y, en particular, la que corresponde a los elementos cársicos.
- Cuantificar la carga de visitantes que puede soportar el sistema, cuando se pretenda un uso recreativo.
- Identificar y controlar la diversidad biológica subterránea, así como diseñar y ejecutar las medidas de conservación adecuadas.

Para alcanzar tales metas se concibe un conjunto de tareas en tres etapas, a saber:

1. Diseño y puesta en funcionamiento de la Red de Monitoreo.
2. Calibración de la Red de Monitoreo: optimización espacial y frecuencial del tipo de monitoreo, elaboración y calibración de los modelos conceptuales y matemáticos.
3. Diseño e implantación del Sistema de Gestión.

FÓSILES EN LAS CUEVAS

Las cuevas favorecen la fosilización pues garantizan una protección contra la intemperie y un rápido proceso de enterramiento, ya sea por deposición de precipitados calcáreos procedentes de la actividad de goteo interna (importante en restos óseos acumulados por depredadores, animales caídos por oquedades, animales muertos en el interior de las cuevas, etc.) o por su funcionamiento como poljas (se deposita en el interior de la cavidad gran cantidad de sedimento proveniente del exterior que arrastra consigo restos de animales o plantas, estos restos son los más destruidos y contienen la mayoría de los fósiles) donde la acumulación rápida de sedimentos da a los restos un sepultamiento más profundo y permanente.

Muchas de las localidades fosilíferas en Cuba corresponden a épocas geológicas recientes (pleistoceno y holoceno) y por la propia distribución del carso la mayoría de los depósitos se encuentran en el Centro y el Occidente de Cuba. Durante este período el territorio actual del archipiélago ya había emergido por lo que en la fauna registrada son abundantes las formas terrestres. En el límite del pleistoceno al holoceno ocurre la última gran extinción de la biota en el planeta, fenómeno que afectó también a Cuba. Generalmente se considera que este proceso se debió a cambios en el clima, las temperaturas se hacen más cálidas y aumenta la humedad, lo que provoca cambios bruscos en el medio. La llegada del hombre a Las Antillas (±10 000 años antes del presente) influyó de manera considerable en la extinción de especies. Este fenómeno se hizo más drástico con el comienzo del proceso de colonización española. Entre las causas que propiciaron esto, se encuentran la introducción, deliberada o no, de especies foráneas, la destrucción de los bosques, la caza de especies autóctonas, entre otras.

La mayor parte de los fósiles de vertebrados descritos para Cuba corresponden a la época del pleistoceno. Las características paleoclimáticas de la época garantizaron que se acumularan gran cantidad de restos de animales

en el interior de las cuevas, arrastrados por las aguas de lluvias intensas y frecuentes. Precisamente el sepultamiento rápido, por arrastre de sedimentos al interior de las cuevas, motivó que los restos de esta época se encuentran restringidos a depósitos en cuevas. Otro elemento que posibilitó grandes acumulaciones en las cavidades fue el uso, como refugio, de éstas por algunos depredadores como las lechuzas. Las cavidades también pudieron funcionar como trampas en las que cayeron los animales o quedaron atrapados por algún fenómeno geológico. Al ser las cuevas sistemas cerrados y aislados del intemperismo exterior, muchos de los restos pudieron fosilizarse sin haber sufrido enterramiento.

Para la época del pleistoceno se han descrito especies de peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Vale destacar, la diversidad de aves que caracterizó al pleistoceno de Cuba, las cuales constituían los principales depredadores de los ecosistemas de esta etapa, dada la falta de mamíferos terrestres de alimentación carnívora. Esto, unido a la ausencia de enemigos naturales, posibilitó que crecieran extraordinariamente, disminuyendo la capacidad de volar: ejemplo es el género *Ornimegalonyx*, pariente cercano de los búhos actuales, cuya talla lo convirtió en el mayor búho del mundo. Un representante del grupo de los teratornítidos es otro fósil de ave encontrado en nuestro territorio para esta época. Dichas aves vivieron en Norte y Sudamérica y reciben este nombre que se refiere a su aspecto monstruoso. Un representante sudamericano de este grupo (*Argentavis*) alcanzó una envergadura alar comparable a la de una avioneta Cessna.

Los mamíferos cubanos colectados en depósitos del cuaternario están representados por los órdenes: Primates (una especie), Rodentia (21 especies), Quiróptera (25 especies considerando una especie fósil nueva, en proceso de publicación que se colectó en Viñales, Pinar de Río), Xenarthra (cinco especies), Insectívora (cuatro especies). Dentro de estos se destaca el *Megalocnus rodens* que fue el mayor mamífero terrestre cubano de todos los tiempos. En el descubrimiento de estos restos se esconden historias, más o menos complicadas que muestran que describir y ubicar filogenéticamente a una especie no es un asunto tan sencillo y otros en los que se aprecia que la llegada del hombre occidental a Las Antillas acompañado de pasajeros indeseables, como las ratas, ha influido de manera significativa en la composición de la fauna actual. Desde que se descubrieron los primeros restos de la megafauna de vertebrados de Cuba han sido numerosos los sucesos que han despertado en la comunidad científica internacional un interés marcado por Las Antillas.



Fig. 28. Vértex y otras piezas fósiles de *Megalocnus rodens* en el piso de una caverna en la provincia de Pinar del Río.

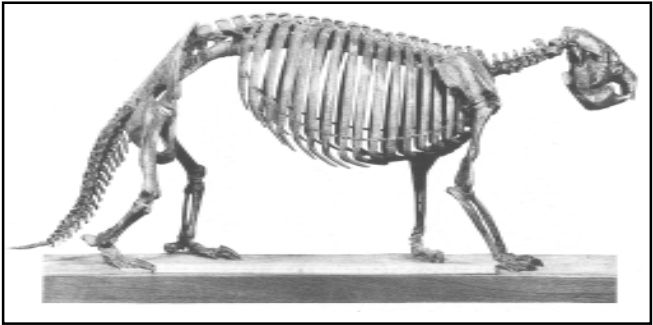


Fig. 28a. Reconstrucción de un ejemplar de *Megalocnus rodens*.

Corría el año 1861 cuando los primeros restos conocidos de desdentados fósiles cubanos, provenientes de los Baños de Ciego Montero, al sudeste de Cienfuegos, llegaron a manos de Felipe Poey, destacado naturalista cubano que lo presentó ante la Academia de Ciencias de La Habana. Las primeras descripciones de este material fueron publicadas en 1868 por Joseph Leidy en Filadelfia y por Alphonse Pomel en París, adelantándose Leidy por unos meses. Leidy reconoció la afinidad de estos restos con desdentados, y los ubicó en el género *Megalonyx* de Norteamérica, y no con roedores como primariamente se pensaba. Pomel, por su parte destacó que la presencia en Cuba de desdentados fósiles era una evidencia de la relación de la fauna del cuaternario de Las Antillas con el continente americano, que pudo arribar a las islas posiblemente a través de La Florida. Hacia 1910, el doctor Carlos De la Torre se interesa por el tema y comienza a coleccionar nuevos materiales en Ciego Montero y en la Sierra de Jatibonico, conformando una importante colección que fue presentada y entregada al Museo Americano de Historia Natural, en New York. Esta colección, sirvió de referencia para numerosos estudios posteriores que permitieron determinar, entre otras cosas que los desdentados de Las Antillas estaban representados por varias especies y géneros, todos endémicos del área, por lo que su evolución queda restringida a la misma. Además, que la mayor afinidad de esta fauna es con perezosos suramericanos, de donde posiblemente arribaron en etapas tempranas de la formación de Las Antillas (eoceno tardío-oligoceno temprano).

En agosto de 1987, miembros del Grupo “Pedro Borrás” de la Sociedad Espeleológica de Cuba comenzaron a explorar un nuevo Sistema de Cavernas, el cual ocupa toda la mitad occidental de la Sierra de Galeras, municipio Viñales, provincia de Pinar del Río, Cuba. Al descenderse un pozo vertical de 23 m, en una de las muchas cuevas que conforman el Sistema de la Gran Caverna del arroyo Constantino (desde entonces nombrada como Cueva del Mono Fósil) se encontró un cráneo de mono en estado fósil, que en estudios posteriores resultó ser una especie de primate antropoideo endémico (ya extinto) de Cuba, posteriormente clasificado como *Paralouatta varonai*. Nuevos descubrimientos fueron realizados, y se agregaron más de 100 restos de monos fósiles (incluidos más de 50 dientes) pertenecientes a la misma especie, los que llegaron a alcanzar el mayor récord en el registro de estos mamíferos extinguidos dentro del grupo insular de Las Antillas. El hallazgo demostró que vivieron monos nativos en el pasado geológico de la mayor de Las Antillas, polémica que tardó casi un siglo en resolverse desde que el doctor Luis Montañé encontró dientes de un mono pequeño del género *Ateles* en 1888, en una pequeña cueva de las montañas del Escambray.

Estudios más avanzados (cladísticos) realizados recientemente, indican ahora que los más de 100 restos fósiles de monos hallados en Sierra de Galeras, Pinar del Río, parecen estar más relacionados con monos americanos del género *Calicebus* y no con los monos aulladores (*Alouatta*) como hasta ahora se suponía.

Otro caso interesante es el de la foca tropical (*Monachus tropicalis*). Este mamífero marino habitó en el Caribe hasta principios del siglo pasado, los últimos avistamientos registrados datan de alrededor de 1920. El material tipo de esta especie fue colectado en Cuba y hay registros de la evolución de este grupo en depósitos de otras regiones de Las Antillas, por ejemplo en La Española. Sin embargo, en Cuba todos los restos encontrados de dicha especie están asociados a sitios arqueológicos y forman parte de prendas utilizadas por nuestros aborígenes.

Entre los ejemplos más representativos de extinciones recientes, debido a la llegada de la rata a Las Antillas se encuentra el caso de las musarañas del género *Nesophontes*. Este es un insectívoro de aspecto muy semejante al almiquí pero mucho más pequeño, incluso que un guayabito. El parentesco entre el almiquí y las musarañas está aún por dilucidar pues los científicos no se ponen de acuerdo sobre que criterio seguir para definirlo, si la forma de los dientes (que es diferente en ambos grupos) o la anatomía externa e interna (que es muy semejante). Otro

punto discutido es si fue consumido o no por los aborígenes. La mayor parte de los restos de este grupo aparecen asociados a depósitos formados por regurgitaciones de lechuza, lo que permite inferir que posiblemente eran animales de hábitos nocturnos, al igual que el almiquí. Por lo regular, la lechuza utiliza como refugio diurno las entradas de las cuevas o amplias solapas. Los aborígenes cubanos también aprovechaban este recurso como refugio y para enterrar a sus muertos, por eso, en ocasiones aparecen relacionados restos de musarañas a sitios aborígenes. Sin embargo, la mayor parte de la comunidad científica acepta que la extinción de este animal se debe a la influencia de la rata, debido a la voracidad de estos roedores y a su gran capacidad de dispersión. Parece que este animalito se extinguió antes sólo en Puerto Rico, donde las evidencias más recientes corresponden a un periodo anterior a la llegada de los españoles y posterior a la llegada de los aborígenes.

El estudio de estos grupos permite reconstruir los ambientes donde vivieron, aportando datos a la historia evolutiva de nuestro territorio. De esta manera es posible conocer cómo llegó a estas islas la biota que actualmente la conforma.

La presencia en Las Antillas de una gran diversidad de mamíferos y reptiles endémicos (grandes perezosos, más de 20 especies de jutías fósiles, una especie de quelonio terrestre semejante a la tortuga gigante de las Islas Galápagos, cocodrilos fósiles, etc.) demuestra que las condiciones climáticas que prevalecieron en Cuba hace más de 10 000 años, eran al menos, mucho menos hostiles para el desarrollo de una amplia comunidad de mamíferos terrestres, que hoy pertenecen al pasado. Por esto se afirma que el clima de gran parte de Cuba durante finales del período pleistoceno (últimos 18000 a 125000 años A.P) era mucho más frío y en general más seco que el actual, existiendo una tendencia gradual al calentamiento global, lo que se confirma a través de otros datos, entre ellos, muchos que se han podido deducir de las crónicas de la época de la conquista, cuando los cascos de las carabelas españolas chocaban con los carapachos de miles de tortugas verdes, y en los mares de los alrededores de Cuba se reportaba la presencia de una foca tropical, hoy también extinguida.



Fig. 29. Esqueleto completo de un ejemplar fósil de jutía conga (*Capromys pilorides*), hallado en una caverna de Pinar del Río.

HISTORIA DE LA ESPELEOLOGÍA EN CUBA

Las primeras reseñas de las cuevas de Cuba están dadas por Cristóbal Colón en su diario, donde señala que los indios vivían en cuevas. Luego los investigadores que comenzaron a visitar y estudiar las cuevas eran fundamentalmente arqueólogos y este es el caso del norteamericano Mark R. Harrington quien a principios del siglo XX realizó exploraciones en algunas de las cuevas de Cuba para la Fundación Heyes, más tarde Smithsonian Institution.

Harrington visitó varios sitios en el oriente y occidente de Cuba, cuando fue llevado por los campesinos de la zona a la Cueva de la Patana, descubrió en una estalagmita

un ídolo tallado, y de inmediato comenzó a aserrar la gruesa estalagmita con la idea de llevarlo a Estados Unidos, para lo que fue necesario picarlo en varias partes. Junto con el ídolo sacó del país miles de piezas arqueológicas y restos humanos. Después de varios años de gestiones, dichos restos humanos fueron devueltos a Cuba por el Museo del Indio Americano de la Smithsonian para ser enterrados, lo que se realizó en enero del 2003 en la comunidad de Caridad de los Indios, Guantánamo.

En la actualidad, se continúan las conversaciones para el regreso a Cuba del ídolo aborigen de La Patana, así como de algunas de las piezas extraídas por este arqueólogo. Fernando Ortiz, Carlos de la Torre, el venezolano Cándido Bolívar, Ernesto Tabío y muchos otros arqueólogos y biólogos visitaron y estudiaron muchas de las cuevas de Cuba en esta primera mitad del siglo XX. Pero no es hasta el 15 de enero de 1940 cuando Antonio Núñez Jiménez y otros jóvenes crearon la Sociedad Espeleológica de Cuba (SEC), y se inician en nuestro país los verdaderos estudios espeleológicos.



Fig. 30. Desenfardelamiento de momia peruana en Trinidad. De izquierda a derecha Dr. Núñez Jiménez, Dr. Manuel Rivero de La Calle y Dr. Guarch Delmonte.

En esos primeros años se dedicaron a realizar expediciones y estudios en sitios cercanos a la capital de la República. Posteriormente comenzaron a ampliar el radio de acción de sus exploraciones. Desde el principio la SEC dirigió sus exploraciones al estudio científico de las cavernas y no al deportivo. En 1945 comenzó la Expedición Geográfica a Oriente cuando tres miembros de la SEC lograron ascender el Pico Turquino y navegar por el entonces desconocido río Toa. La SEC realizó en la cuenca del río Cuyaguatzeje importantes descubrimientos para la ciencia en Cuba, entre ellos que ese río cruzaba en dos oportunidades la Sierra antes de salir al valle de Luis Lazo, se estudia y publica un libro sobre las cuevas de Bellamar, se descubren la Gran Caverna de Santo Tomas, las cuevas de Caguanes y otras muchas en todo el país. Se hacen valiosos aportes a la arqueología cubana y al mejor conocimiento de las cavernas con arte rupestre en todo el archipiélago.

La SEC logra que el Historiador de la Ciudad de La Habana le entregue un sector de la antigua muralla de La Habana y en ella instala su Museo, el cual es visitado por mucho público. Este local fue asaltado por la policía de la tiranía de Batista y son detenidos varios de los miembros de la SEC. Antonio Núñez Jiménez publica, en 1954 un libro de Geografía de Cuba en el que denuncia, entre otras cosas, cómo vivían los campesinos en Cuba, el uso y tenencia de la tierra por latifundistas, lo que hizo que el gobierno de Batista, mandara a recoger, quemar y destruir dicho libro, así como la detención del autor.

En aquel período no eran muchas las instituciones que se dedicaban a la exploración y conocimiento de la natu-

raleza cubana y, en particular, de las cavernas, pudiendo citarse al Grupo Humboldt, de Oriente.

Varios miembros de la SEC hoy figuran dentro de la lista de mártires de la Patria: El doctor Mario Pozo Ochoa, Alfredo Álvarez Mola y ya en la Revolución Pedro Borrás Astorga que cayó en Playa Girón. Al triunfo de la Revolución los miembros de la Columna 8 Ciro Redondo abren y devuelven a la SEC su local social.

El 15 de enero de 1960 se celebró el 20 Aniversario de la Fundación de la SEC, en ese aniversario, en que estuvo presente el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, se le entregó el título de Miembro de Honor de la SEC, en su trascendental discurso dijo la frase que hoy es todo un símbolo *El futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia.*

A partir de ese año comienzan a establecerse nuevos grupos espeleológicos en distintas provincias pero todos se agrupan dentro de la SEC. La Academia de Ciencias de Cuba crea el Movimiento de Aficionados a la Ciencia y se amplian mucho más por este motivo los grupos espe-

leológicos. La SEC crece en número y en prestigio, algunas de las tareas de la Revolución tienen que ser realizadas por miembros de la SEC, sobre todo, respecto al Estudio del Teatro de operaciones militares de las Fuerzas Armadas Revolucionarias.

En 1970 se celebra en La Habana el Simposium 30 Aniversario de la SEC. Convenios firmados por la Academia de Ciencias comienzan a llegar al país importantes figuras del mundo especializados en el carso y estudian estos fenómenos con especialistas cubanos el doctor Vladimir Panos y Otakar Stecl de Checoslovaquia, Bernard Geze y Alain Mangin, de Francia, Traian Orghidan y un grupo de biólogos rumanos, así como investigadores, soviéticos, alemanes, etcétera. Gracias a esta colaboración

se realiza el primer Mapa Carsológico de Cuba, publicado en el *Atlas Nacional de Cuba*, al que siguieron los Mapas Ingeniero Geológico del Carso Cubano y las tres versiones, entre 1974 y 1987, del Mapa Hidrogeológico del Carso Cubano, a escalas 1:1000000 y 1:500000.

Con el paso de los años la SEC continua creciendo en miembros y nuevos grupos se fundan en lugares donde antes no existían, y se destacan por sus trabajos el Grupo Martel, Grupo Borrás en Ciudad de La Habana, Grupo Sama en Sancti Spiritus, el Martel de Camagüey, Carlos de la Torre en Matanzas, entre otros. Dirigido por Antonio Núñez Jiménez un grupo de espeleólogos escriben la obra *Cuevas y Carsos*, como libro de texto para formar a los nuevos espeleólogos. Se crea, junto a la Gran Caverna de Santo Tomás, la Escuela Nacional de Espeleología, donde han cursado estudios de diferente grado centenares de espeleólogos.



Fig. 31. Durante una reunión de los miembros de la S.E.C. (1949-1950). De derecha a izquierda el cuarto (de pie) es el Prof. Oscar Arredondo, a continuación el Dr. Manuel Rivero de La Calle y cuarto (de rodillas) Dr. Antonio Núñez Jiménez.

Desde el Simposium de 1970 se continuó realizando el mismo en los años 75, 80 y 85 y en 1990, al conmemorarse el medio siglo de fundada la SEC, se desarrolló en el Palacio de Convenciones el primer congreso de la SEC denominado Congreso 50 aniversario, posteriormente se celebraron el 55 aniversario en provincia La Habana y el 60 aniversario en Camagüey. En estos momentos los espeleólogos cubanos se preparan para el Congreso 65 aniversario en el 2005.

La SEC ha estado presente en los congresos internacionales de la Unión Internacional de Espeleología, en Olomouc Checoslovaquia, Bowling Green, Estados Unidos, Budapest, Hungría, Beijing, China, y Suiza, donde se han dado a conocer importantes estudios realizados en Cuba. Grandes cavernas han sido descubiertas por la SEC, entre ellas Majaguas Cantera, Los Perdidos, Palmarito Pan de Azúcar, Gato Jíbaro, etcétera.

El desarrollo de las técnicas de buceo hizo que se creara la Sección Nacional de Espeleobuceo y que los espeleólogos comenzaran a explorar y estudiar las cuevas subacuáticas. Se han logrado importantes descubrimientos en cuevas con grandes lagos subterráneos como Juanelo Piedra, Cristalitos de Papaya y otras. Mediante las técnicas de cuerdas se realizan descensos en furnias de todo el país, entre ellas, Jíbara y Pipe.

La Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe, fue creada en Bowling Green Estados Unidos. En 1981 ésta celebró su primera reunión en Viñales, Cuba, con la participación de numerosos países del área y su primer presidente, fue el a su vez presidente de la SEC Antonio Núñez Jiménez.

En estos momentos, en la bibliografía espeleológica se cuenta con valiosas publicaciones realizadas por miembros de la SEC. Nuevas comisiones de trabajo han sido creadas y se destacan la Comisión de Hidrogeología Cársica, la de Espeleobuceo y la de Espeleosocorro que brindan sus conocimientos a la SEC y colaboran con los organismos estatales en el estudio de los acuíferos cársicos y su protección contra la contaminación y en protección en caso de catástrofes. Estas comisiones han llevado a cabo varios cursos y talleres internacionales.

La SEC está constituida en comités provinciales donde los espeleólogos poseen en sus archivos, datos, mapas, resultados de investigaciones, fotos, y muestras de todos los estudios realizados en el Archipiélago Cubano. Numerosas expediciones internacionales se organizan con espeleólogos de Estados Unidos, Italia, Francia, Suiza, Eslovenia, España y otros países los que junto con miembros de la SEC estudian distintas áreas del país.

PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE SUBTERRÁNEO

Con independencia de la importancia que tiene preservar el carso y las cuevas como parte de la salvaguarda de la geodiversidad global, en las áreas cársicas y, en las cavernas en particular, se presentan un número considerable de valores económicos, culturales y científicos que es necesario conservar adecuadamente.

Entre los valores económicos, por ejemplo, no es superfluo recordar la agricultura, bosques, recursos hídricos, minería y turismo, entre los más comunes. Los valores científicos son innegables y numerosos. Para los geólogos, las áreas cársicas constituyen zonas de excelente exposición para identificar unidades litológicas, estructuras geológicas y yacimientos minerales, así como sitios paleontológicos importantes. Representativo de un relieve particular, el carso retiene considerable información sobre los cambios hidrológicos y climáticos ocurridos a lo largo de la historia geológica del planeta y de la región, en particular, expuestas y muchas veces magníficamente conservados en los sedimentos y morfología de las cuevas. Precisamente en ellas, bajo tierra, es que se conservan, mejor que en cualquier otro entorno, los restos arqueológicos y paleontológicos.

El carso y las cuevas también albergan valiosas especies de plantas y animales en peligro de extinción o únicas. Diversas regiones cársicas han servido de refugio para

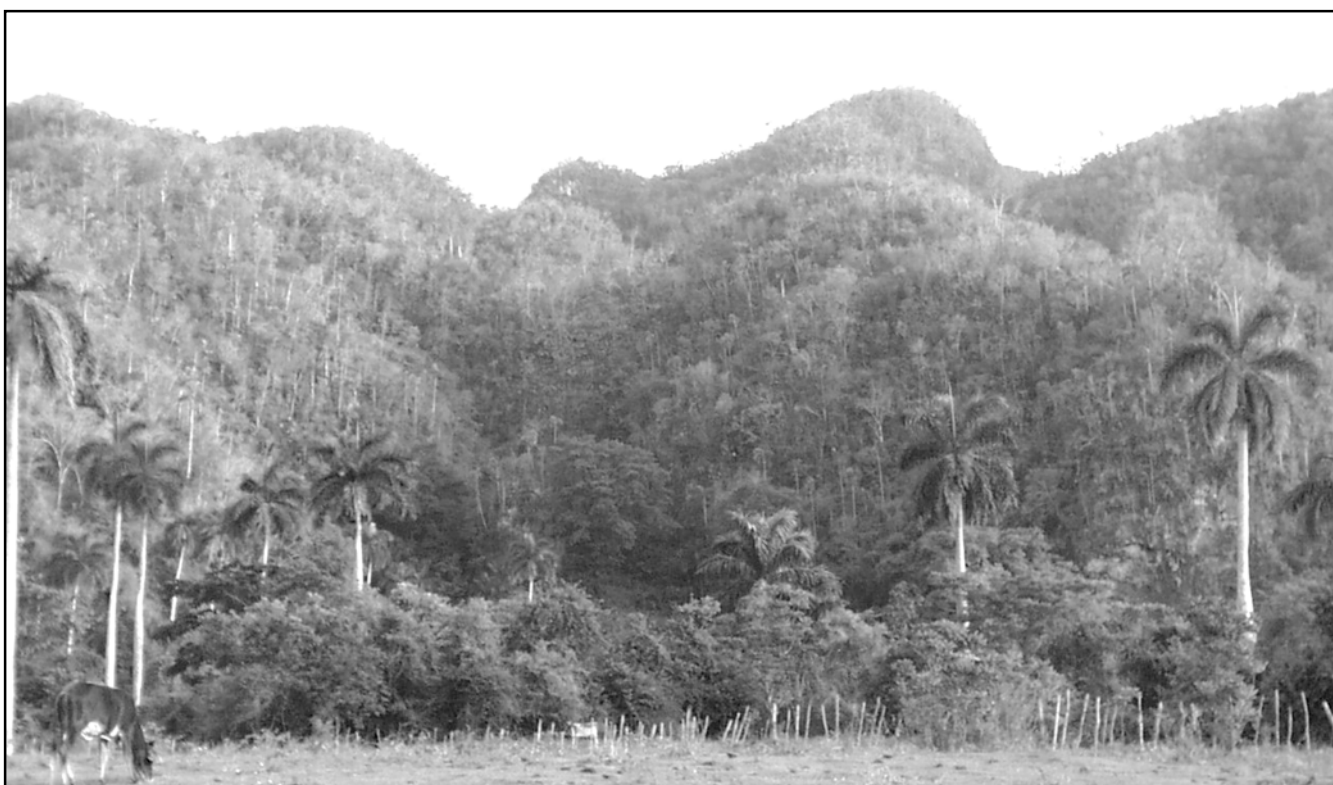


Fig. 32. Paisaje cársico de montaña (Mogotes de Cuba).

especies animales que han logrado sobrevivir bajo tierra cuando, en superficie, los cambios ambientales hicieron desaparecer a sus parientes. Aunque los murciélagos son las criaturas que, con mayor frecuencia se asocian a las cuevas, existe una impresionante variedad de animales endémicos del carso muchos de los cuales constituyen pequeñas poblaciones o están fuertemente adaptados a las características del medio ambiente subterráneo.

La visita y exploración de las cuevas es una actividad que, cada año ocupa a millones de personas, tanto las que visitan cuevas adaptadas para el turismo como los que se dedican a la investigación o a los deportes de riesgo y aventura.

Un patrimonio considerable está asociado al carso que, no obstante, es un entorno frágil y vulnerable. Ello se debe, ante todo, a que la integridad de cualquier ecosistema cársico es en extremo dependiente de la relación entre las aguas, la tierra, la vegetación y los suelos.

Principales amenazas a que están sometidos el carso y las cuevas:

- Destrucción total, como consecuencia de la minería, buldoceo, inundación por obras hidráulicas, pavimentación para la construcción de sistemas viales o por rellenamiento con desechos y residuos.
- Perturbaciones de la tierra y el agua, como la forestación-deforestación, explotación de canteras, desmonte, construcción, actividades agrícolas, disposición de residuos y desechos, derivación de sistemas fluviales, sobreexplotación de las aguas subterráneas, entre otras, pueden perturbar con fuerza los terrenos cársicos.
- Contaminación por residuos agrícolas, domésticos, industriales y, sobre todo, migración de hidrocarburos o transmisión de enfermedades hídricas se han documentado desde hace decenas de años en áreas cársicas, que comenzó por la epidemia de cólera de Londres en 1854.
- El uso de las cavernas por el hombre es también una fuerte amenaza ambiental. Ello incluye su empleo con objetivos militares, religiosos, sanitarios, para el cultivo de hongos, conservación de quesos y vinos, o como teatros y auditorios musicales. Tales usos provocan impactos como:
 - Alteración de la estructura física de la cueva, química de las aguas, hidrología de las cavernas; y movimientos del aire y del microclima.
 - Introducción de iluminación artificial.
 - Compactación o liquefacción de los suelos.
 - Erosión de o perturbación de los sedimentos de las cavernas y sus componentes.
 - Destrucción de espeleotemas, así como de la fauna y la flora.

- Introducción de organismos o materiales extraños y ajenos al medio (especies animales, algas, hongos, hormigón, metales, entre otros).

Medidas estructurales y no estructurales: aspectos institucionales, jurídicos y educación ambiental

Como parte de la evolución de la conciencia ambiental a nivel global, ha existido un constante fortalecimiento institucional en los países como respuesta de los diferentes estados y gobiernos a los compromisos internacionales asumidos. Es así que el Decreto-Ley número 147 de 21 de abril de 1994 sobre "Reorganización de los Organismos de la Administración Central del Estado" creó el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), al que le fueron conferidas las atribuciones y funciones de dirigir, ejecutar y controlar la política del Gobierno en materia ambiental.

Al constituirse el CITMA se crean un grupo de dependencias que contribuyen a dar mayor coherencia a la política ambiental nacional, es así que surge la Dirección de Política Ambiental, hoy Dirección de Medio Ambiente, la Agencia de Medio Ambiente, el Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental, el Centro Nacional de Áreas Protegidas y la Oficina de regulación Ambiental y Seguridad Nuclear, donde se incluye el Centro de Inspección y Control Ambiental. De igual manera, se crean las delegaciones provinciales del CITMA y las unidades de medio ambiente y un especialista del CITMA en cada municipio, lo cual ha permitido dar seguimiento a los instrumentos de política y gestión generados en los últimos seis años para aumentar la prioridad y atención a los temas ambientales.

Es necesario también mencionar los principales documentos rectores de la política ambiental cubana generados en los últimos años, entre ellos tenemos a la Estrategia Ambiental Nacional, las estrategias ambientales provinciales y sectoriales, la Estrategia Nacional de Educación Ambiental, el Programa Nacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía, así como Estrategia Nacional para la Diversidad Biológica, todos con incidencia directa e indirecta en los ecosistemas cársicos.

En el orden jurídico se destacan la promulgación e implementación de la Ley 81 "Ley del Medio Ambiente", este texto legal establece en su Título Tercero, "Instrumentos de la política y la gestión ambiental" los instrumentos que utiliza la política ambiental cubana para la gestión y le dedica, un capítulo a cada uno de ellos, los cuales son:

- Estrategia Ambiental Nacional, Programa Nacional de Medio Ambiente y Desarrollo, y los demás progra-

mas, planes y proyectos de desarrollo económico y social.

- La presente Ley, su legislación complementaria y demás regulaciones legales destinadas a proteger el medio ambiente, incluidas las normas técnicas en materia de protección ambiental.
- Ordenamiento ambiental.
- Licencia ambiental.
- Evaluación de Impacto Ambiental.
- Sistema de Información Ambiental.
- Sistema de Inspección Ambiental Estatal.
- Educación ambiental.
- Investigación científica y la innovación tecnológica.
- Regulación económica.
- Fondo Nacional del Medio Ambiente.
- Regímenes de responsabilidad administrativa, civil y penal.

Como parte de los procesos de implantación de la Estrategia Ambiental Nacional y la Estrategia Nacional de Educación Ambiental, en cada provincia y en el Municipio Especial Isla de la Juventud, existen Programas Territoriales de Educación Ambiental, así como estructuras (grupos provinciales, consejos, redes, etc.) que dan seguimiento a las acciones previstas para cada año. Organismos y organizaciones tienen firmados convenios con el CITMA para dar particular atención a las políticas y la gestión en educación ambiental.

Dada la amplia presencia de cavernas en nuestro territorio, el rol que estas han desempeñado en la historia de Cuba, así como la alta fragilidad y dinámico papel que juegan los ecosistemas carsícos en los procesos de desarrollo del país; el tratamiento de estos temas en los programas y proyectos de educación ambiental debe ser mayor. En tal sentido sería importante que a nivel de cada territorio se amplíe el quehacer conjunto de los espe-

de vista de protegerlos si no también de las afectaciones negativas que pueden traer para los proyectos, tales como derrumbes, contaminación, etcétera.

Otro importante instrumento es el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Cuba se encuentran incluidas las principales cuevas cubanas, entre ellas se destacan las enclavadas en los Parques Nacionales como Viñales, el cual posee en su interior la Gran Caverna de Santo Tomás y Palmarito; las cuevas con elementos de la prehistoria cubana de Guanahacabibes, en el Parque Nacional Guanahacabibes; el sistema cavernario de Caguanes, dentro del Parque Nacional Caguanes, que incluye además las cuevas de los Cayos de Piedras; cuevas con pictografías aborígenes del Sur de la Isla de la Juventud, en la Reserva Ecológica Punta del Este y el Parque Nacional Punta Francés; las cuevas arqueológicas del Parque Nacional Desembarco del Granma, entre otras. En resumen, las más importantes cuevas de nuestro país se encuentran dentro de las categorías de manejo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, aunque no están protegidas independientemente.

Como ya se ha comentado, todavía no existe una legislación que proteja en Cuba, las cuevas por sí mismas. No obstante, el CITMA, y otras instituciones del país cuenta con regulaciones, donde son atendidos algunos de los recursos del carso, como las aguas subterráneas, según la letra del Decreto Ley 138: De las Aguas Terrestres. También, posee tres documentos jurídico-legales que permiten regular la investigación, prospección, conservación y protección del patrimonio arqueológico y paleontológico, a saber:

- Ley No. 2 de los Monumentos Nacionales y Locales.
- Decreto No. 55. Reglamento para la ejecución de la Ley de los Monumentos Nacionales y Locales.
- Resolución No. 11. Sobre la preservación y Conservación de los Sitios Arqueológicos de nuestro país.

Conservación del patrimonio espeleológico

Las cuevas poseen valores científicos, recreativos y escénicos únicos. Pero esos valores están amenazados tanto por descuido como por deliberado vandalismo y, una vez perdidos, son irremplazables. La responsabilidad de la protección de las cavernas corresponde no sólo a los espeleólogos o visitantes ocasionales, a las autoridades o comunidades, sino a toda la población. La conservación del patrimonio espeleológico se basa en una política realista, encaminada a estimular la autodisciplina entre los

espeleólogos y turistas, gestores y administradores, a la educación e investigación relacionada con el origen y la prevención de los daños en las cavernas.

Todo el contenido de una caverna: sedimentos, espeleotemas, flora, fauna y restos, en general, son importantes para su interpretación científica y disfrute. A falta de medidas estructurales, como leyes y reglamentos que protejan las cuevas por sí mismas, el mayor énfasis debe ponerse en aquellas medidas no estructurales. Por esta razón, los grupos de visitantes deben dejar la caverna tal y como la encontraron. Deben disponer de medios para evacuar los residuos de todo tipo, reducir las marcas y señales indispensables al menor número posible y removerlas en cuanto sea posible, como aquellas asociadas a los levantamientos topográficos y, en especial, ejercer extremo cuidado en no dañar las cristalizaciones ni los depósitos de cualquier tipo, perturbar la vida de los organismos cavernícolas o incrementar innecesariamente los senderos interiores.

La colecta científica de especímenes de roca, sedimentos, minerales o material biológico es tarea profesional, selectiva y mínima; por ello la colecta de materiales

minerales o biológicos, incluso aquellos previamente fracturados o muertos, no se justifica nunca, ya que se estimula a otros a hacer lo mismo y destruye el interés por la cueva. Los espeleólogos deben ser cuidadosos en extremo al momento de publicar las localizaciones exactas de cuevas susceptibles de vandalismo antes de que se tomen medidas adecuadas para su protección.

Conservación del patrimonio paleontológico

La protección del patrimonio paleontológico cubano ha sido, desde principios de la revolución una responsabilidad de nuestros órganos legislativos. Así, en los años 60 se promulgaron las leyes No. 1 y 2 de Patrimonio, que contemplan la protección de patrimonio arqueológico y paleontológico, así como el natural. La Ley No. 1 para la Protección del Patrimonio Nacional, establece que las obras constructivas deben parar de inmediato, tras la detección de un sitio arqueológico y paleontológico y el hecho de ponerse en conocimiento de las instituciones pertinentes para su evaluación y toma de decisión correspondiente. La Ley No. 2, sobre la base del decreto No. 55 (Reglamento para la ejecución de la Ley No. 2 de los Monumentos Nacionales y Locales) establece en su Capítulo XIII las regulaciones para la ejecución de las "Investigaciones Arqueológicas y Otras" (donde se incluyen las paleontológicas, sedimentológicas y geológicas por solo citar algunas) con un articulado muy preciso que prevé las regulaciones necesarias para acometer las investigaciones, antes señaladas.

La Ley No. 81 de julio de 1997, se concentra en la protección y uso racional de los recursos naturales, sin dejar de la mano al patrimonio paleontológico y otros valores culturales y patrimoniales.

No obstante, la incursión de personal en áreas de un depósito fosilífero debe obedecer a ciertas reglas, que garanticen que el sitio permanezca lo más inalterado posible. De este modo, al encontrar restos de animales o plantas con aspecto de restos fósiles se debe evitar la manipulación y el traslado. Si se hace, se modifica el contexto en que éstos se encuentran, lo cual provocaría la pérdida de información que puede resultar irrecuperable para el investigador. Dados los pocos indicios con que cuenta un paleontólogo al realizar su labor, cualquier dato, por insignificante que parezca puede resultar decisivo para demostrar o eliminar una hipótesis de trabajo. Cuando se va a modificar un sitio de valor paleontológico, con fines constructivos es recomendable utilizar técnicas de prospección paleontológica, con las que se busca una rápida movilización y estudio del área para garantizar, en corto tiempo, la menor pérdida posible de datos.

Protección de los sitios arqueológicos

La conservación y protección de los sitios arqueológicos es una tarea y responsabilidad de todos y cada uno de los ciudadanos, pues en ellos se encuentran los vestigios y evidencias de nuestro pasado más reciente —comparados con el momento en que aparecen los homínidos sobre la tierra de África hace 7-5 millones de años. Los fechados más tempranos para nuestro país alcanzan escasamente los 6 mil años. Lograr que las instituciones estatales, sus administraciones y los propietarios privados y particulares cumplan con lo establecido en la legislación relacionada con la protección y conservación del patrimonio cultural y natural es una labor muy difícil pero no imposible. Para ello se establece que cualquier hallazgo fortuito de *evidencias arqueológicas* debe ser comunicado a la *Comisión Nacional de Monumentos* para que sea investigado por el organismo competente; aclarando incluso que la responsabilidad de la notificación recae, *exclusivamente*, en el descubridor u organismo e institución a la que pertenece o a la persona particular que lo realiza. No son pocos los ejemplos de sitios arqueológicos que han sido seriamente afectados e incluso desaparecidos por la intervención y realización de inversiones en el área, incumpliendo las regulaciones antes mencionadas, además de que en no po-



Fig. 33. Taller de Educación Ambiental desarrollado en el Acuario Nacional de Cuba, como parte del proyecto Mapa verde.

leólogos, la autoridad ambiental y las direcciones de educación, con el objetivo de ampliar el conocimiento tanto a nivel nacional como local sobre los temas relacionados con los paisajes carsícos, los riesgos ambientales asociados al manejo de dichos ecosistemas y la definición de políticas y acciones a favor del uso sostenible de estos ecosistemas.

Existen instrumentos de gestión ambiental que son aplicables a la protección de los territorios cárscicos tales como los Estudios de Impacto Ambiental. Asimismo, la resolución 77 regula la solicitud de Licencias Ambientales para las nuevas inversiones, y éstas conllevan Estudios de Impacto Ambiental según sean el Proyecto y las condiciones del lugar donde se realizarán. En el caso de los territorios cárscicos se contemplan requisitos de estudios que deben incluir su caracterización, esto permite detectar cualquier acción que pudiera impactar territorios tan frágiles y tomar medidas de protección e inclusive negar la realización del proyecto. No sólo desde el punto

cas ocasiones se obvia la presencia de un arqueólogo en los estudios previos de impacto ambiental.

Mención aparte merecen los *aficionados a la arqueología*. La proliferación de los aficionados es muy antigua en nuestro país y en el mundo en general. Sería interminable la lista de los importantes y transcendentales descubrimientos arqueológicos llevados a cabo por los aficionados por su perseverancia, voluntad e interés científico; pero para obtenerlos se hace imprescindible cumplir cuatro reglas fundamentales:

- 1. Una correcta organización del colectivo.
- 2. Superación profesional constante en las ciencias sociales –Arqueología, Antropología, Historia, Sociología– y otras ciencias naturales y técnicas auxiliares.
- 3. Asesoría de un especialista con la suficiente experiencia en la disciplina.
- 4. Cumplir *rigurosamente* las regulaciones legislativas correspondientes.

Este no es el caso de otros *aficionados* acostumbrados a buscar, recoger, guardar, y en no pocas ocasiones vender los objetos, creando serias dificultades a la labor de los investigadores de intentar la reconstrucción de los modos de vida de los pueblos que habitaron el residuario en cuestión. Muchas colecciones conformadas por los poco escrupulosos *aficionados a la arqueología* han llegado a nuestros museos, por disímiles vías, sin una clasificación y catalogación adecuada, y las piezas han perdido todo su valor científico, imposibilitando la localización posterior del sitio para su estudio. En los casos más lamentables se ha perdido el paradero de los ejemplares que en ocasiones son únicos y excepcionales.

El ánimo de estas líneas es lograr que se entienda que no existe nada más lejos de la verdad y violatorio de la legislación de nuestro país que el desafortunado ejemplo de los tres muchachos armados con pala, pico y farol carretero haciendo una excavación *arqueológica* en una cueva, que se transmitiera en el espacio televisivo *El tesoro de la Cueva*. El problema de las intervenciones arqueológicas incontroladas realizadas por no profesionales es un fenómeno que dificulta, malogra las investigaciones y distorsiona el contexto que rodeaba a los sitios y yacimientos, de ahí la imagen errónea que se crean los especialistas sobre el lugar en cuestión al emprender la investigación.

El registro gráfico rupestre visto desde el punto de vista científico, es un documento único, un registro arqueológico inigualable, porque realmente abre paso a entender la ideología de los grupos que lo ejecutaron, de las sociedades que los hicieron parte del sentido de sus vidas. La gráfica parietal representa una porción importante del patrimonio histórico común, y es uno de los más ricos y expresivos archivos en los que gráficamente se refleja la historia en contraste con la pobreza de la información que proporciona el resto de la cultura material recuperada por la arqueología. Tanto las pictografías como los petroglifos están sujetos al lógico envejecimiento de sus soportes y de los pigmentos o aglutinantes. Éstos, luego de creados y con el paso del tiempo –que en no pocas ocasiones alcanzan los 2 000 años para Cuba, llegando a antigüedades de hasta 35 000 años en África– también se ven dañados por la acción de agentes biológicos, físicos y químicos presentes a la entrada e interior de cuevas y solapas.

Aspectos éticos y de conservación en el espeleobuceo

No se debe concluir este trabajo sin mencionar la significación del código de ética y la actitud de protección del medio ambiente que debe primar en el espeleobuzo. Estos aspectos garantizan en primer lugar nuestra seguridad y la de nuestros compañeros y, en segundo, la conservación del entorno: un ambiente fascinante y hermoso pero a la vez muy frágil y peligroso. Solo si se mantiene una actitud responsable y juiciosa es posible llegar tras un correcto aprendizaje y entrenamiento a hacer de la práctica de esta apasionante actividad una actividad segura para todos sin que el medio ambiente cavernario se

vea afectado. La falta de entrenamiento arrasa con las formaciones secundarias, deja huellas imborrables durante siglos en los sedimentos depositados y por último, la falta de control en el manejo y uso de las mismas, termina causando la desaparición de la fauna autóctona troglobia de las cavidades más visitadas.

Es preciso insistir en el hecho de que *nadie que no posea el entrenamiento adecuado, el equipamiento técnico específico y necesario para este tipo de actividad, debe aventurarse a realizarla*. Téngase siempre presente que las cuevas inundadas constituyen paisajes hermosos e interesantes pero al mismo tiempo, trampas mortales para aquellos imprudentes que se atreven a violar las normas estrictas del espeleobuceo.

La Sección Nacional de Espeleobuceo de la Sociedad Espeleológica de Cuba ha colocado, en algunas cuevas del país, carteles con la siguiente inscripción “Si no está entrenado en espeleobuceo, no siga, no hay nada en esta cueva por lo que valga la pena perder la vida”, estos avisos se pueden encontrar bajo el agua, donde termina la zona de caverna y comienza la cueva.

Interrelación del hombre con los ecosistemas cársicos

Antes de desarrollar cualquier acción de intervención educativa en cualquier elemento del paisaje, es necesario reconocer qué tipo de interacciones se producen, por tanto, es indispensable desarrollar un recorrido de lo que ha sido la relación de los seres humanos con los ecosistemas cársicos a escala global y en nuestro contexto.

No será igual la intervención educativa en una comunidad que maneja inadecuadamente sus desechos y emplea como basurero accidentes cársicos con el consecuente impacto para la salud de sus habitantes, que aquella que se deberá hacer con quienes toman decisiones en cuanto a políticas de desarrollo a escala nacional o local con impactos también para estos ecosistemas.

El *turismo de naturaleza* que hoy cobra cada vez mayor fuerza como dirección importante de nuestra oferta en el mercado internacional y que en su variante del Campismo Nacional es ya una opción consolidada de más de 20 años, exige una capacitación muy particular en cuanto a la dinámica y particularidades de los ecosistemas cársicos para el personal que maneja estos recursos, lo cual tributará a la protección y la durabilidad de los mismos.

En cuanto a la *extracción de petróleo*, ésta se hace tanto en tierra firme como en aguas costeras, y próximamente en aguas profundas. Conocer los posibles impactos ambientales de la actividad que realizan, los problemas que ello genera, cómo mitigarlos y sobre todo evitarlos, les dará a las empresas las pautas para un manejo ambiental responsable de su gestión y la posibilidad de optar por reconocimientos que prestigien a la entidad tanto nacional como internacionalmente, lo cual evitará posibles daños que en la mayoría de los casos tienen impactos dañinos en extremo y con solución a muy largo plazo.

Respecto al tema de la *producción energética*, se trae este ejemplo porque resulta un poco más difícil de entender la relación existente entre la contaminación atmosférica y los posibles impactos negativos a los ecosistemas cársicos. La política seguida por el país para buscar la independencia energética a partir del consumo del crudo nacional, sin depender de la compra de combustible necesario en los centros de comercio internacional, dadas las limitaciones por los altos precios, ha ocasionado en primer lugar el enorme beneficio de alcanzar un elevado porcentaje de autoabastecimiento del combustible necesario

para dar continuidad al desarrollo económico y social del país, pero a su vez, los elevados componentes de azufre del crudo cubano han incrementado los indicadores de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Por tanto, deberá monitorearse los impactos que pueden ocasionar a la población y los diferentes ecosistemas, siendo el paisaje cársico muy sensible a la corrosión por la posible incidencia de lluvias ácidas. Una capacitación ambiental bien dirigida a quienes de una manera u otra se vinculan con todo el proceso de la política y la gestión de la energía del país, contribuirá a una correcta toma de decisiones que ayuden a mitigar los problemas que se deriven del uso del crudo nacional.

Tabla 13. Records nacionales e internacionales de longitud y profundidad cavernarias.

LAS 20 MAYORES CAVERNARIAS DEL MUNDO		
Nombre	País	Longitud en metros
Mammoth Cave	Estados Unidos	871 817
Optimistscheskaja	Ucrania	212 000
Jewel Cave	Estados Unidos	200 837
Holloch	Suecia	182 640
Lanthuilla	Estados Unidos	171 204
Fisher Ridge	Estados Unidos	168 310
Wind Cave	Estados Unidos	163 436
Nieborghergate	Suecia	146 000
Urmaja	Ucrania	117 000
Qua Air Jernih	Malasia	109 000
Coume d'Hyvermeide	Francia	101 000
Ojo Guareña	España	100 000
Travada Nova Vista	Brazil	92 100
Purification	México	90 470
Zakuscha	Ucrania	80 300
Hindibonjo	Austria	85 400
Frans Hole	Estados Unidos	77 272
Rauscherkarhöhle	Austria	71 826
Cu del Ha	México	70 000
Enlengl	Reino Unido	70 000
LAS 30 CAVERNARIAS MÁS PROFUNDAS DEL MUNDO		
Nombre	País	Profundidad en metros
Vamirja	Georgia	1 710
Lampreschaden	Austria	1 632
Mickla	Francia	1 616
Jean Bernard	Francia	1 602
Torra del Gerni	España	1 589
Vjacheslav Panjushina	Georgia	1 566
Ceki 2	Eslovenia	1 485
Antena Huapila	México	1 476
Antena del Trava	España	1 441
Big Buloh	Malasia	1 416
Lendzoko Alemoko Letzou	Reino Unido	1 408
Cabanciana	Francia	1 382
Antena Chava	México	1 380
Evren Gunay	Turquía	1 377
Intezhenja Mezhenyaga	Georgia	1 370
Monte Saint Martin	Francia	1 342
Nieborghergate	Austria	1 340
Arvenha Jaina	Georgia	1 301
Comenzhenko Berger Plattenack	Austria	1 281
Gouffre Berger	Francia	1 271
LAS CINCO MAYORES CUEVAS CUBANAS		
Nombre	Provincia	Longitud en metros
Sistema Paimarim	Pinar del Río	48 000
Gran Caverna de Santo Tomas	Pinar del Río	40 000
Sistema Cavernario Los Perdicos	Pinar del Río	38 000
Sistema Cavernario Majaguas-Carrera	Pinar del Río	33 600
Gran Caverna de Fuentes	Pinar del Río	17 000
LAS CINCO MAYORES CUEVAS CUBANAS MÁS PROFUNDAS		
Nombre	Provincia	Profundidad en metros
Cueva Hungla	Cienfuegos	422 (7)
Acuaris	Pinar del Río	271
Bima Bentlage	Cienfuegos	266
Cueva Jibani	Santiago de Cuba	248
Vascago	Cienfuegos	224